

Víctor Luís Padilha

**MODELAGEM HIDROLÓGICA ORIENTADA POR EVENTOS
DE INUNDAÇÃO EM LAGES/SC**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Nadia Bernardi Bonumá, Dr^a.

Coorientador: Prof. Sílvio Luís Rafaeli Neto, Dr.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Padilha, Víctor Luís

Modelagem hidrológica orientada por eventos de
inundação em Lages/SC / Víctor Luís Padilha ;
orientadora, Nadia Bernardi Bonuma; coorientador,
Sílvio Luís Rafaeli Neto - SC, 2017.
174 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis,
2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Modelagem
hidrológica. 3. HEC-HMS. 4. Eventos. 5. Inundação. I.
Bonuma, Nadia Bernardi. II. Rafaeli Neto, Sílvio
Luís. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.
IV. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
CENTRO TECNOLÓGICO

PPGEA

“Modelagem Hidrológica Orientada por Eventos de Inundações em Lages/SC”

VÍCTOR LUÍS PADILHA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:

Prof.ª Nadia Bernardi Bonumá, Dr.ª
(Orientadora)

Prof. Silvio Luis Raffelli Neto, Dr.
(Coorientador)

Prof.ª Alexandra Rodrigues Finotti, Dr.ª

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffa, Dr.

Prof. Fernando Mainardi Fan, Dr.

Prof. Patrícia Inoue Uda, Dr.ª

Prof.ª Maria Efiza Nagel Hassemer, Dr.ª
(Coordenadora)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
FEVEREIRO/2017

Este trabalho é dedicado à minha família, em especial minha avó Natália, por todo o apoio e suporte que tive durante todos os anos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois se esse dia chegou, foi pelo fato de sempre ter fé e perseverança frente às dificuldades. Nele, depus as minhas escolhas e decisões e é assim que vejo ele me guiando tanto na vida pessoal como na vida acadêmica e profissional. É por isso que, muito mais que qualquer outra coisa, agradeço por todas as oportunidades e realizações que tive até hoje.

Agradeço a minha família, a todos e mais em especial aqueles que estiveram mais próximos de minha jornada acadêmica desde a graduação na UDESC até a pós-graduação na UFSC. Começo agradecendo ao meu avô Carlos e, mais em especial, a Natália, minha avó que em dezembro de 2016 descansou e partiu desse mundo deixando a mensagem de sempre termos foco nos nossos objetivos e ambições, porém nunca esquecer ao longo deste caminho o que, de fato, faz valer a pena viver. Nos primeiros anos de universidade e envolvimento com a iniciação científica foram eles que me acolheram em sua casa e foram meus segundos pais durante meus primeiros anos de universidade. Ainda, nesse mesmo período, agradeço a parceria e amizade da vivência com meu tio e meu primo, Ederson e Andrei. Acima de tudo, gostaria de deixar registrado o maior “Muito Obrigado!” possível a meus pais, Luís e Rosângela, que sempre me apoiaram em momentos alegres e tristes, além de respeitar minhas escolhas mesmo que muitas vezes não concordassem, sempre auxiliando no que fosse preciso e estando ao meu lado todo o tempo. Não posso esquecer de destacar meu irmão, Lucas, que mesmo sendo o caçula, sempre esteve de prontidão pra não deixar a tristeza tomar conta, fazendo sua palhaçadas. E também, minha madrinha, Sueli Aparecida Cabral Szast, que pelo seu exemplo de pessoa ética, esforçada e guerreira sempre me incentivou nos estudos, assim como minha tia, Elisângela Bitencourt Padilha, exemplo de quem luta, alcança seus objetivos.

Agradeço a uma grande parceira, Annelise, que além de ser minha namorada, foi principalmente, Amiga. Sempre paciente para entender as dificuldades dessa jornada e uma grande conselheira em momentos de indecisão.

Agradeço a todos os professores que tive contato, os quais muitos posso chamar de amigos, que foram parceiros desde os ensinamentos dentro da sala de aula até os conselhos “extraclasse” em decisões referentes a vida acadêmica e profissional, tentando contribuir da melhor maneira possível, e pela confiança, paciência e pela dedicação em ensinar. Destaco a amizade com minha orientadora e professora Nadia Bernadi Bonumá, que me deu liberdade em escolher a área de estudo e linha de,

além dos valorosos conselhos para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial também ao meu amigo e professor coorientador Sílvio Luís Rafaeli Neto, que acreditou em mim desde a iniciação científica, quando iniciamos essa parceria e foi o que nos proporcionou grandes realizações e resultados, além das inúmeras conversas e debates para tomadas de decisão.

Agradeço aos integrantes do laboratório de hidrologia da UDESC (LABHIDRO-UDESC) pelo auxílio nas atividades de campo e a convivência e parceria com os integrantes do laboratório de hidrologia (LABHIDRO-UFSC) e de hidráulica. Quanto aos órgãos atuantes no município, agradeço ao apoio operacional da Polícia Ambiental de Santa Catarina, da Defesa civil, dos Bombeiros e própria Prefeitura.

Também agradeço a Agência Nacional de Águas (ANA), ao Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (EPAGRI-CIRAM), as Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilidade de dados e reuniões informativas sobre a coleta dos mesmos para execução deste trabalho.

Por fim, agradeço ao PPGEA/UFSC e a CAPES por me proporcionar tamanha formação acadêmica e tantas oportunidades de trabalhos científicos, e a parceria entre as instituições UFSC e UDESC para o desenvolvimento do presente trabalho.

Fica registrado o meu Muito obrigado a todos!

RESUMO

Desastres ambientais por inundação têm ocorrido com frequência em inúmeras regiões do mundo. Na região serrana do estado de Santa Catarina não tem sido diferente, sendo observados impactos tanto em áreas rurais quanto em núcleos urbanos. Deste modo, os modelos hidrológicos têm sido escolhidos como ferramentas de suporte aos instrumentos de gestão e planejamento de recursos hídricos. Amplamente utilizado no mundo, o modelo hidrológico HEC-HMS é uma ferramenta para a compreensão da resposta hidrológica de bacias hidrográficas a eventos extremos. O objetivo geral deste trabalho foi investigar, por meio da modelagem orientada por eventos, a resposta hidrológica das sub-bacias urbanas de Lages/SC no sistema Caveiras Montante 1 em três eventos diferentes. Neste contexto, a cidade registrou eventos extremos que causaram desastres por inundação nos últimos anos. Foram selecionados três eventos distintos em 2005, 2008 e 2011 com as áreas inundadas delineadas para calibrar e testar o HEC-HMS e avaliar seus resultados e estimativas. Os resultados encontrados proporcionaram valores de volume de escoamento superficial direto e de vazão de pico associados aos eventos, permitiram o conhecimento dos parâmetros otimizados com maior influência, além de produzir hidrogramas para as bacias hidrográficas do rio Ponte Grande e Carahá, as quais não possuem dados fluviométricos observados, e contam com as recorrentes ocorrências de inundações. Por fim, isto permitiu dar suporte para o conhecimento dos processos hidrológicos dentro do denominado sistema Caveiras Montante 1 e verificar a transferência de parâmetros entre sub-bacias inseridas num mesmo sistema.

Palavras-chave: inundações, eventos extremos, HEC-HMS, sub-bacias, resposta hidrológica, Lages/SC.

ABSTRACT

Environmental disasters by flood have occurred frequently in different regions of the world. It has not been different in Santa Catarina mountainous region, observing the impacts in both rural and urban areas. The support with the hydrological models to the water resources management and planning tools. Widely used in the world, the HEC-HMS hydrological model is an essential tool for the comprehension of the hydrological response of watersheds to extreme events. The general aim of this work was to investigate, through event-oriented modeling, the hydrological response of the urban sub-basins of Lages/SC in the Caveiras Montante 1 system during three different events. In this context, the city recorded extreme events that caused environmental disasters by flood in recent years. It was selected three distinct events in 2005, 2008 and 2011 with mapped flood areas to calibrate and test the HEC-HMS, and to assess the results and estimates. The results obtained provided values of direct surface flow volume and peak flow associated to events, allowed the knowledge of optimized parameters with greater influence, and besides all this, the hydrographs from the Ponte Grande and Carahá watersheds, which do not have observed fluviometric data, and it has recurrent flood occurrences. Finally, this allowed to support the knowledge of the hydrological processes within the Caveiras Montante 1 system and to verify the parameters transfer between sub-basins inserted in the same system.

Keywords: Floods. extreme events. HEC-HMS. sub-basins. hydrological response.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esboço conceitual dos termos enchentes, inundações e alagamentos.....	26
Figura 2 – Uso do SIG para representação de alagamento após desastre por inundação.....	29
Figura 3 – Propósito dos modelos chuva-vazão.....	31
Figura 4 – Processos relacionados com a geração de vazão no exutório da bacia.....	34
Figura 5 – Convolução de hidrogramas.....	40
Figura 6 – Hidrograma Unitário SCS adimensional.....	41
Figura 7 – Representação simplificada do escoamento subterrâneo para análise com método de recessão no HEC-HMS.....	44
Figura 8 – Separação do escoamento de base.....	45
Figura 9 – Armazenamento aproximado de acordo com o método de <i>Muskingum</i>	47
Figura 10 – Esquema do procedimento de calibração.....	49
Figura 11 – Hidrogramas observado e simulado.....	51
Figura 12 – Exemplo de busca de parâmetro ótimo através do <i>Univariate-Gradient Search Algorithm</i>	54
Figura 13 - Exemplo de busca de parâmetro ótimo através do <i>Nelder and Mead Simplex Search Algorithm</i>	54
Figura 14 – Fluxograma metodológico do trabalho.....	58
Figura 15 – Área de estudo, localização do sistema Caveiras Montante 1.....	60
Figura 16 – Localização dos afluentes urbanos do rio Caveiras em Lages/SC.....	63
Figura 17 – Dados de temperatura média mensal (1941-2014) da estação Lages pertencente ao INMET/EPAGRI-CIRAM.....	64
Figura 18 – Dados de precipitação média mensal da estação Lages pertencente ao INMET/EPAGRI-CIRAM.....	65
Figura 19 – Localização das estações pluviométricas e fluviométrica e polígonos de Thiessen no sistema Caveiras Montante 1.....	66
Figura 20 – Tipos de solos no sistema Caveiras Montante 1.....	68
Figura 21 – Uso e ocupação do solo no sistema Caveiras Montante 1..	69
Figura 22 – Modelo Digital de Terreno do sistema Caveiras Montante 1.....	71
Figura 23 – Resposta imediata na vazão do rio Carahá no evento do dia 26/09/2015. a) Antes do evento. b) Durante o evento.....	73

Figura 24 – Fotografias do sobrevoo realizado no evento de 2011. a) Inundações e consequentes alagamentos no rio Ponte Grande. b) Inundações no rio Carahá.....	74
Figura 25 – Principais áreas de inundação para o evento de 2005 nos rios Carahá e Caveiras.	75
Figura 26 – Principais áreas de inundação para o evento de 2008 nos rios Ponte Grande e Carahá.....	76
Figura 27 – Principais áreas de inundação para o evento de 2011 nos rios Ponte Grande, Carahá e Caveiras.....	77
Figura 28 – Distribuição espacial da chuva para a vazão de pico de 2005.	80
Figura 29 – Distribuição espacial da chuva para a vazão de pico de 2008.	81
Figura 30 – Distribuição espacial da chuva para a vazão de pico de 2011.	82
Figura 31 – Esquema conceitual dos elementos hidrológicos na interface do HEC-HMS.....	86
Figura 32 – CN médio ponderado por sub-bacias para o sistema Caveiras Montante 1.	88
Figura 33 – Parâmetros indicados no método de Propagação de onda <i>Muskingum-Cunge</i> no HEC-HMS.	93
Figura 34 – Confirmação <i>in loco</i> de parâmetros físicos relacionados ao rio Ponte Grande.	94
Figura 35 – Confirmação <i>in loco</i> de parâmetros físicos relacionados ao rio Carahá.....	94
Figura 36 – Equipamento <i>Q-boat</i> para confirmação <i>in loco</i> de parâmetros físicos relacionados ao rio Caveiras. a) Controle remoto e rádio do equipamento. b) Montagem no laboratório. c) Execução de perfil batimétrico. d) Interface do software <i>WinRiver 2</i> apresentando dados.	95
Figura 37 – Resultados prioritários monitorados para calibração indicados na interface do modelo HEC-HMS.....	99
Figura 38 – Gráfico de dispersão dos dados simulados e observados na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2005.	101
Figura 39 – Gráfico de dispersão dos dados simulados e observados na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2008.	101
Figura 40 – Gráfico de dispersão dos dados simulados e observados na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2011.	102
Figura 41 – Comparação de hidrogramas observado e simulado na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2005.	103

Figura 42 – Comparação de hidrogramas observado e simulado na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2008.....	103
Figura 43 – Comparação de hidrogramas observado e simulado na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2011.....	104
Figura 44 – Balanço hídrico da sub-bacia Ponte Grande para os três eventos de estudo.	111
Figura 45 – Balanço hídrico da sub-bacia Carahá para os três eventos de estudo.	112
Figura 46 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Ponte Grande em 2005.	113
Figura 47 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Ponte Grande em 2008.	113
Figura 48 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Ponte Grande em 2011.	114
Figura 49 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Carahá em 2005.	114
Figura 50 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Carahá em 2008.	115
Figura 51 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Carahá em 2011.	115
Figura 52 – Hidrograma das seções para o evento de 2005.	120
Figura 53 – Hidrograma das seções para o evento de 2008.	121
Figura 54 – Hidrograma das seções para o evento de 2011.	121
Figura 55 – Hietograma observado e hidrograma simulado na sub-bacia Ponte Grande em 2005.	123
Figura 56 – Hietograma observado e hidrograma simulado na sub-bacia Ponte Grande em 2008.	124
Figura 57 – Hietograma observado e hidrograma simulado na sub-bacia Ponte Grande em 2011.	124
Figura 58 – Hietograma observado e hidrograma na sub-bacia Carahá em 2005.	126
Figura 59 – Hietograma observado e hidrograma na sub-bacia Carahá em 2008.	127
Figura 60 – Hietograma observado e hidrograma na sub-bacia Carahá em 2011.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais modelos matemáticos da família HEC.	33
Tabela 2 – Descrição das funções dos elementos hidrológicos conceituais.....	35
Tabela 3 – Cálculos, métodos disponíveis e resultados do HEC-HMS.	37
Tabela 4 – Limites para parâmetros de calibração já incluídos no HEC-HMS.	50
Tabela 5 – Identificação do esquema conceitual de sub-bacias do sistema Caveiras Montante 1.....	59
Tabela 6 – Períodos escolhidos para a modelagem hidrológica.	78
Tabela 7 – Descrição dos eventos selecionados.	79
Tabela 8 – Dados dos eventos extremos escolhidos para o estudo.....	84
Tabela 9 – Tempos encontrados para as sub-bacias do sistema Caveiras Montante 1.	90
Tabela 10 – Valores típicos de k de acordo com a contribuição antecedente da sub-bacia.	91
Tabela 11 – Parâmetros do escoamento de base para as sub-bacias do sistema Caveiras Montante 1.....	92
Tabela 12 – Parâmetros do método de propagação de onda <i>Muskingum-Cunge</i> para os trechos do rio Caveiras inseridos no sistema Caveiras Montante 1.	96
Tabela 13 – Limites para parâmetros de calibração utilizados pelo usuário.	98
Tabela 14 – Volume observado, volume antes e após otimização na estação fluviométrica Ponte Velha.	99
Tabela 15 – Vazões de pico observadas, antes e após otimização na estação fluviométrica Ponte Velha.	100
Tabela 16 – Índice de Eficiência NSE no período de calibração e testes na estação fluviométrica Ponte Velha.	104
Tabela 17 – Volume Residual no período de calibração e testes na estação fluviométrica Ponte Velha.	105
Tabela 18 – Efeito principal e forma de calibração de parâmetros no HEC-HMS para a bacia de estudo.....	109
Tabela 19 – Parâmetros otimizados para as sub-bacias nos eventos selecionados.	110
Tabela 20 – Vazão de pico das seções escolhidas para os eventos.	122
Tabela 21 – Resultados do modelo HEC-HMS para a sub-bacia Ponte Grande e comparação com vazão de pico calibrada no rio Caveiras. .	125
Tabela 22 – Resultados do modelo HEC-HMS para a sub-bacia Carahá e comparação com vazão de pico calibrada do rio Caveiras.	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP – *Accoustic Doppler Current Profilers*
ANA – Agência Nacional de Águas
CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina
CN – *Curve Number*
EPAGRI-CIRAM – Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
ESRI – *Environmental Systems Research Institute*
HEC – *Hydrologic Engineering Center*
HEC-GeoHMS – *Geospatial Hydrologic Modeling Extension*
HEC-HMS – *Hydrologic Modeling System*
HU – Hidrograma Unitário
IDF – Intensidade-Duração-Frequência
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
MDT – Modelo Digital de Terreno
NRCS – *Natural Resoures Conservation Service*
NSE – Coeficiente de Nash e Sutcliffe
PPGEA – Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
 r^2 – Coeficiente de determinação
SCS – *Soil Conservation Service*
SDS – Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Sustentável de SC
SIG – Sistemas de Informação Geográfica
USACE – *US Army Corps of Engineers*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS	22
1.1.1 Objetivo Geral	22
1.1.2 Objetivos Específicos	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 INUNDAÇÃO.....	25
2.2 SISTEMAS DE APOIO A DECISÃO	27
2.2.1 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	28
2.2.2 Modelagem matemática	29
2.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA	30
2.3.1 Simulações contínuas	31
2.3.2 Simulações orientadas por eventos	32
2.4 HEC-HMS.....	32
2.4.1 Funcionamento conceitual	35
2.4.2 Métodos de cálculo empregados	38
2.4.2.1 Perdas: Cálculo da chuva efetiva.....	38
2.4.2.2 Transformação: Chuva-vazão.....	40
2.4.2.3 Escoamento de base	43
2.4.2.4 Propagação de onda nos canais	46
2.4.3 Avaliação dos resultados	48
2.4.3.1 Índices de qualidade dos ajustes.....	50
2.4.3.2 Métodos iterativos para calibração automática	53
2.4.4 Aplicações práticas	55
3. MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 ÁREA DE ESTUDO	59
3.1.1 Suporte de SIG – HEC-HMS	61
3.1.2 Clima	64
3.1.3 Caracterização e uso do solo	67
3.1.4 Altimetria	70
3.1.5 Eventos selecionados	72
3.2 APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.....	85

3.2.1 Criação do esquema conceitual.....	85
3.2.2 Determinação do CN.....	86
3.2.3 Determinação do tempo de retardo ou <i>Lag time</i>	89
3.2.4 Determinação do escoamento subterrâneo	90
3.2.5 Determinação das medidas físicas da calha dos canais.....	92
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
4.1 MODELAGEM ORIENTADA POR EVENTOS.....	97
4.1.1 Calibração.....	97
4.1.2 Análise do evento de 2005.....	105
4.1.3 Análise do evento de 2008.....	106
4.1.4 Análise do evento de 2011.....	107
4.2 VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO	108
4.2.1 Cálculo de Perdas da chuva	110
4.2.2 Cálculo de Transformação chuva-vazão.....	116
4.2.3 Separação do Escoamento de Base	118
4.2.4 Cálculo da Propagação de onda do canal.....	119
4.3 RESPOSTA HIDROLÓGICA DO SISTEMA	119
4.3.1 Resposta do sistema Caveiras Montante 1	120
4.3.2 Resposta das sub-bacias urbanas.....	122
4.3.2.1 Bacia hidrográfica do rio Ponte Grande.....	123
4.3.2.2 Bacia hidrográfica do rio Carahá	126
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
REFERÊNCIAS.....	131
APÊNDICES	139
ANEXOS.....	150

1. INTRODUÇÃO

O registro da gravidade e frequência dos eventos de inundação têm aumentado consideravelmente e, conseqüentemente, têm gerado uma crescente preocupação global sobre a necessidade de diminuir as mortes relacionadas com este tipo de desastre e as perdas econômicas associadas (SARHADI *et al.*, 2012).

A ocorrência de desastres por inundação com inúmeros danos ambientais e sociais tem uma tendência crescente no Brasil. Muitas cidades brasileiras não têm levado em conta o impacto da urbanização na drenagem das águas pluviais, principalmente durante eventos extremos. As áreas impermeáveis associadas a tal urbanização, caso se encontrem a montante de determinada área, transferem seus efeitos para jusante, resultando na ocorrência de inundações frequentes nos exutórios de bacias urbanas (SMITH, 2001). Geralmente, os órgãos responsáveis pelas cidades, mesmo com profissionais da engenharia, não possuem o conhecimento necessário que abrange os processos hidrológicos de forma sistemática para lidar com este problema.

O aumento da frequência de inundações em ruas, terrenos e outras áreas urbanas requerem modelagem matemática, com ênfase para a simulação de bacias pouco estudadas (ŠUSTIĆ *et al.*, 2008). Desta forma, a modelagem hidrológica é uma ferramenta comumente usada para estimar a resposta hidrológica da bacia hidrográfica devido à certa quantidade de precipitação de entrada em um sistema (HALWATURA e NAJJIM, 2013; ZOPPOU, 2001). Para a efetiva gestão de desastres por inundação em áreas urbanas, além do delineamento das áreas suscetíveis à inundação, o conhecimento do hidrograma de cheia com seus respectivos volumes de escoamento, vazão de pico e tempos do hidrograma de cheia são muito importantes (GUL *et al.*, 2009; OLIVERA e MAIDMENT, 2000).

Neste trabalho, foi utilizado o *Hydrologic Modeling System* (HMS) ou sistema de modelagem hidrológica, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE). Um sucessor do modelo HEC-1 do Centro de Engenharia Hidrológica (HEC), o HEC-HMS é amplamente utilizado em análises de engenharia hidrológica para simular o processo chuva-vazão, podendo representar a resposta da bacia hidrográfica em um evento extremo (ALFREDSEN e SAETHER, 2000; AL-ABED *et al.*, 2005; KNEBL *et al.*, 2004).

Como foco deste trabalho, a cidade de Lages, principal centro econômico da região serrana de Santa Catarina, é sustentada principalmente pela pecuária, agricultura, indústria madeireira e turismo

rural. Tais setores, num âmbito nacional, possuem grande relevância econômica, social e ambiental, o que remete aos desastres por inundação que ocorrem na cidade, os quais causam prejuízos significativos a ponto de influenciar a economia do município. Registrou-se diversas inundações e alagamentos, como por exemplo, nos anos de 1997, 2005, 2008, 2011 e 2013 (S2ID, 2016), o que, devido aos impactos causados, justifica e prioriza a execução de pesquisas para melhorar a gestão dos riscos de inundações, tal como praticada na União Europeia e nos Estados Unidos (CORDEIRO; RAFAELI NETO, 2015). Além disso, esta problemática ganha mais ênfase ao perceber que diversas intervenções realizadas pelos gestores do município nos cursos d'água locais não proporcionaram resultados influentes na resposta das bacias hidrográficas do sistema, implicando em prejuízos provenientes das vazões de pico dos eventos. Portanto, o núcleo urbano de Lages, que representa uma área de aproximadamente 125km², tem sua maior área inserida nas bacias hidrográficas dos rios Ponte Grande e Carahá, sub-bacias do rio Caveiras.

Deste modo, busca-se desenvolver uma pesquisa que norteie futuros trabalhos nesta área de estudo, a qual em breve poderá contar com maior abundância de dados observados. Apesar da estrutura estatal já criada e da disponibilidade de dados de monitoramento atualmente, não há conhecimento científico desses eventos para a região na literatura ou qualquer investigação nesse sentido.

O conhecimento da resposta das sub-bacias Ponte Grande e Carahá a diferentes eventos extremos, empregando-se a investigação por meio da modelagem orientada por cada evento selecionado, representa uma visão detalhada dos mecanismos que geram as vazões de pico durante os desastres por inundação. Assim, a relevância científica deste trabalho é a aplicação do modelo HEC-HMS na modelagem hidrológica orientada por diferentes eventos em bacias pouco estudadas. E a relevância técnica são as informações que podem fornecer suporte para realização de intervenções pelos gestores do município para abrandar os prejuízos causados pelos desastres por inundação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar, por meio da modelagem orientada por eventos, a resposta hidrológica das sub-bacias urbanas de Lages/SC no sistema Caveiras Montante 1 em três eventos diferentes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar, por meio da modelagem orientada por eventos, os volumes e as vazões de pico em Lages/SC;
- Verificar os métodos de cálculo selecionados no modelo hidrológico HEC-HMS e influência de parâmetros otimizados na reprodução do processo chuva-vazão;
- Avaliar diferentes comportamentos das sub-bacias inseridas no sistema Caveiras Montante 1 durante três eventos com diferentes mecanismos causadores de inundação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INUNDAÇÃO

Cheias ou inundações são fenômenos de natureza geográfica que ocorrem no tempo e no espaço, cujos problemas decorrentes tendem a ser de difícil solução porque envolvem variáveis de natureza geográfica (domínio espacial do problema), técnica (conhecimento científico e tecnologia), organizacional (pública, privada e níveis de decisão), social (variáveis do tomador de decisão) e temporal (RAFAELI NETO, 2000).

De acordo com Tucci e Bertoni (2003), as inundações são resultantes da conjugação de diversos fatores, como a intensidade das precipitações, duração, frequência e a respectiva distribuição espacial, assim como ações antropogênicas, a ausência de sistema de planejamento e de educação ambiental da população. Os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da frequência com a qual ocorrem. A ocupação de áreas de riscos de inundação provoca impactos sociais relevantes (TUCCI, 2004).

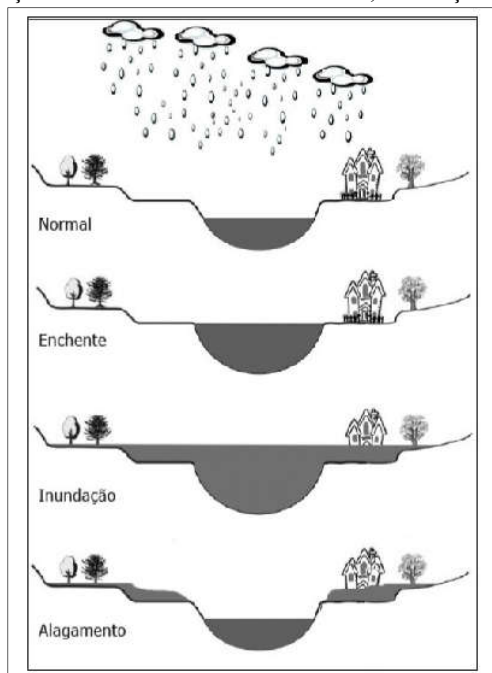
A abordagem adotada neste trabalho se adapta a conceituada anteriormente, onde as inundações e os danos em áreas urbanas podem ser produzidos por dois processos que ocorrem de forma isolada ou combinada que são: inundações de áreas ribeirinhas, nos remetendo a influências naturais nos desastres, como ocorrência de fenômenos físicos decorrentes do movimento dos cursos d'água, e inundações devido à urbanização, que remete a influências antrópicas, como a construção de estruturas hidráulicas.

As inundações ribeirinhas têm sido registradas junto com o desenvolvimento urbano. Elas podem ocorrer em áreas ribeirinhas, onde os rios geralmente possuem dois leitos: o leito menor onde a água escoar na maioria do tempo e o leito maior que é inundado de tempos em tempos. No entanto, historicamente sempre ocorreram para ambos os leitos. Quanto as inundações devido à urbanização, de alguma forma, estas se devem a alguma interferência que o homem criou, como por exemplo, aterros, barragens, dragagens de cursos d'água, impermeabilização do solo, e entre outros, relacionados com obras de drenagem em geral.

Quanto aos termos conceituais, utilizados neste trabalho (Figura 1), “enchentes”, “inundações”, e “alagamentos”, têm significados diferentes. De acordo com Kobiyama *et al.* (2006), “enchentes”, se tratam de grandes chuvas que ocorrem nos rios e geralmente causam o enchimento do leito maior, ou seja, transbordam apenas para as marginais do rio. Quanto à “inundação”, trata-se do aumento do nível dos rios além

do seu nível médio, ocorrendo o transbordamento de suas águas sobre as áreas próximas, além da condição de atingir edificações. Quanto aos “alagamentos”, tratam-se de efeitos causados pós enchentes ou inundações, onde houve o transbordamento do leito e, devido à falta de capacidade de transporte do sistema de drenagem, ficam acumulados volumes de águas nas cidades.

Figura 1 – Esboço conceitual dos termos enchentes, inundações e alagamentos.



Fonte: Goerl e Kobiyama (2005).

Em relação à inundação urbana, esta tem sido mais frequente neste século, com o aumento significativo da população nas cidades e a tendência de serem realizados projetos com uma visão pontual do problema, ou seja, drenando-se as águas o mais rápido possível das áreas urbanizadas (TUCCI; MELLER, 2007).

Segundo o Sistema Integrado de Informações sobre desastres (S2ID, 2016), que integra produtos da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil - SEDEC, e tem o objetivo de qualificar e dar transparência à gestão de riscos e desastres no Brasil, constata-se que existe um elevado número de habitantes atingidos por inundações. Isto parece aumentar à

medida em que os centros urbanos se expandem de maneira desordenada e sem considerar a ocorrência de eventos adversos.

Muitos estudos sobre inundações têm indicado a ocorrência do fenômeno físico, decorrente do movimento dos cursos d'água, denominado remanso e citam a influência deste no agravamento do volume de escoamento superficial das ondas de inundação, devendo-se, principalmente, à existência de barreiras como grandes rios à jusante, planícies florestais inundadas, vertedouro e barragens (KOVACS; KISS; SZEKERES, 2006; VISUTIMETEEGORN; LIKITDECHAROTE; VONGVISESSOMJAI, 2007; NETO; MENEZES; TAVARES, 2012; TELLMAN; SAIERS; CRUZ, 2015).

2.2 SISTEMAS DE APOIO A DECISÃO

Os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) são sistemas de informação dotados de capacidades de modelagem científica, ferramentas de manipulação e de análise de dados, configurados para atender processos de tomada de decisão sobre problemas espaciais (RAFAELI NETO, 2000). Portanto, os SAD's podem ser caracterizados como o acoplamento de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) com um determinado modelo científico ou matemático. Desta forma, Rafaeli Neto (2000) aponta inúmeros benefícios vindos do uso do SAD para a gestão de desastres por inundações. São eles:

- Pode estimular comparações e proporcionar uma referência para a identificação e solução de conflitos;
- Pode produzir conhecimento mais profundo do problema, o que não é óbvio, dada sua natureza complexa;
- Provê um arcabouço que integra informação específica relativa a várias disciplinas envolvidas no problema;
- Provê documentação técnica da decisão, que pode ser utilizada diante de autoridades e opinião pública.

A abordagem por meio de tecnologia SAD foi trazida para este estudo visando utilizá-la para dizer não só quais dados foram utilizados e de onde os mesmos provêm, mas também porque a decisão tomada será a melhor (SIG) e como a informação foi utilizada (modelo matemático).

2.2.1 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

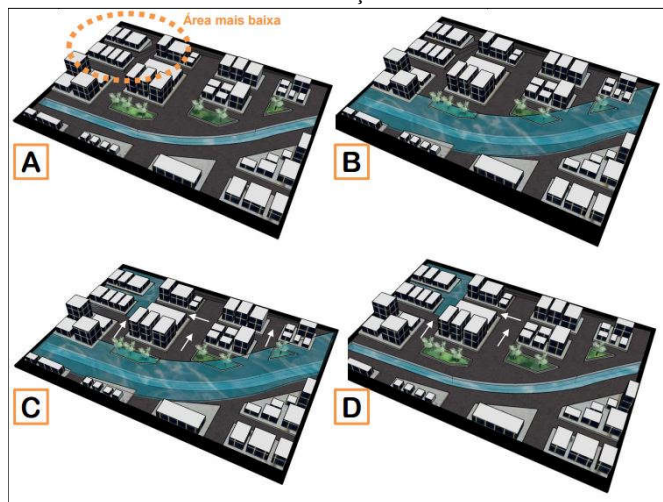
Quanto ao sistema de informações geográficas (SIG), este constitui ferramenta poderosa para executar funções de armazenamento e manipulação de dados espacialmente distribuídos, possui ainda capacidade para realizar análise, sobreposição e cruzamento de informação. Atualmente, é empregado em diversas áreas de conhecimento como cartografia, transporte, energia, comunicações, análise de recursos naturais, planejamento urbano e regional, entre outros (MOREIRA, 2003).

De acordo com Maidment (1993), existem três funções fundamentais que tornam o SIG uma ferramenta importante no processo de modelagem na área de hidrologia:

- Pré-processamento de dados, sendo utilizados como ferramenta para derivar dados de entrada e gerar formatos apropriados para análise;
- Suporte direto na modelagem, nesta fase executa-se tarefas como ajuste, verificação e previsão;
- Pós-processamento, para que os resultados gerados sejam reformatados, tabulados e visualizados no seu contexto espacial.

A integração do SIG com os modelos matemáticos permite manipular dados espacialmente distribuídos, combinar informações topográficas de acordo com o Modelo Digital de Terreno (MDT), o tipo de solo, uso e ocupação do solo, condições meteorológicas relativas às bacias hidrográficas e subdividir em subáreas homogêneas de mesma resposta ou comportamento hidrológico (MACHADO, 2002). Na Figura 2, segue um exemplo do que seria uma utilização do SIG, voltada para paisagem urbana sob ocorrência de desastre por inundação e consequente alagamento devido a existência de uma área mais baixa no terreno.

Figura 2 – Uso do SIG para representação de alagamento após desastre por inundação.



Fonte: Miguez (2001).

A distribuição espacial de um evento extremo de chuva pode determinar a ocorrência ou não de inundações e alagamentos em algumas áreas, como foi ilustrado na figura 2. Deste modo, a variabilidade espacial das chuvas desempenha um papel dominante na modelagem da vazão e seu impacto varia de acordo com a formulação chuva-vazão do modelo selecionado. O fato de o modelo selecionado possuir ou não o acoplamento com as técnicas de SIG tem contribuição direta no resultado final de representação dos processos hidrológicos.

2.2.2 Modelagem matemática

Um modelo é a representação do comportamento de um sistema ou de uma realidade complexa (TUCCI, 1998). Ele melhora o conhecimento acerca de um determinado aspecto e o seu contexto no mundo físico real, sendo muito útil para solucionar problemas que seriam onerosos em uma solução experimental ou muito complicados para tratamento analítico.

De acordo com Campos (2009), os modelos matemáticos são baseados em equações diferenciais que descrevem o sistema modelado e traduzem em sistemas de equações algébricas integradas com métodos apropriados.

Assim, a integração entre modelos matemáticos e SIG vem sendo considerada como um meio adequado para descrever os processos hidrológicos no estudo de bacias hidrográficas. Buscando justificar o uso do modelo matemático acoplado com SIG, existe uma abordagem tradicional para o trabalho com inundações em bacias pouco estudadas e monitoradas (ŠUSTIĆ *et al.*, 2008). Trata-se da aplicação de um modelo hidrológico para determinar a resposta de uma bacia hidrográfica para um determinado período, denominando-se assim modelagem hidrológica.

2.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A importância do modelo em simular o desempenho de processos hidrológicos sob uma variedade de eventos extremos, consideradas as condições existentes e mudanças no uso e ocupação do solo proporciona diversas aplicações. São exemplos, o mapeamento de planícies de inundação, planejamento e projeto de infraestruturas, operação de sistemas de drenagem, mitigação de inundações urbanas, e entre outros (BARNARD *et al.*, 2007).

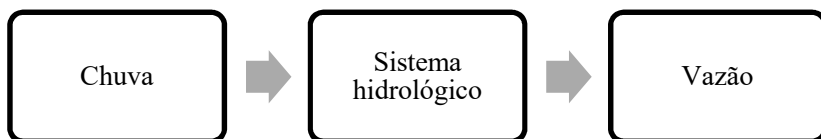
Trazendo o conceito de modelos matemáticos para o contexto da hidrologia, Diskin (1970) considera-os sistemas simplificados que são utilizados para representar a realidade e, ao substituí-la para certos propósitos, estes modelos expressam as condições hidrológicas reais que podem surgir numa bacia hidrográfica.

Os três principais objetivos de um modelo matemático no âmbito da hidrologia, de acordo com Cunge, Holly e Verwey (1980), são:

- Entender como a água escoar por diferentes áreas da bacia hidrográfica, como se distribui em múltiplos canais, que trechos apresentam maiores velocidades, que locais tendem a acumular água, entre outros;
- Estudar e projetar intervenções em um sistema que apresente problemas como o da inundação. Isso significa que, para avaliar o bom funcionamento de um projeto a ser implantado em um rio, é necessário não somente um bom dimensionamento do projeto em si, mas também avaliar a resposta da bacia hidrográfica;
- Prever eventos naturais extremos e suas consequências. Ou seja, é necessário o auxílio de algum tipo de estatística, pois esses eventos, muitas vezes, nunca foram observados e medidos.

De acordo com USACE (2000), modelos de base física são representações de dimensão reduzida dos sistemas do mundo real. O modelo físico de uma bacia hidrográfica é uma grande superfície que possui dispositivos capazes de simular a entrada de precipitação num sistema controlado. A superfície pode ser alterada para simular vários usos do solo, tipos de solo, declividades, entre outros. Assim, a vazão pode ser mensurada, contanto que o sistema esteja fechado e, conseqüentemente, o sistema hidrológico seja simulado.

Figura 3 – Propósito dos modelos chuva-vazão.



Fonte: Adaptado de USACE (1994).

Por fim, os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com critérios focados em sua mecânica, isto é, como trata o tempo dentro de uma simulação, como lida com a aleatoriedade, e assim por diante (USACE, 2000). Ainda, o conhecimento da classificação em relação ao período simulado dentro de um modelo, indica qual modelo utilizar e para qual aplicação, ao separá-los em modelos contínuos e modelos orientados por eventos.

2.3.1 Simulações contínuas

A aplicação de um modelo hidrológico para simulação contínua trata de um período de longo prazo, ou seja, considera as mudanças ocorridas entre diversos eventos, alcançando períodos extremos tanto de seca como de cheia. Portanto, este tipo de simulação é escolhido para locais com disponibilidade de séries históricas longas de dados, calculando respostas provenientes das bacias durante e entre os eventos de precipitação (FORD e HAMILTON, 1996).

A simulação contínua considera o movimento da água por todo o ciclo hidrológico, ou seja, envolvem períodos de precipitação, derretimento de neve (quando houver), detenção e retenção na superfície, infiltração, percolação e evapotranspiração, até onde corre a vazão do curso d'água (USACE, 1994). Logo, continuamente contam com variações de volume no ciclo hidrológico buscando a determinação do

balanço hídrico. Entretanto, necessita mais informações das bacias de estudo e assim torna-se essencial principalmente em estudos de demanda de água.

2.3.2 Simulações orientadas por eventos

Quanto aos modelos orientados por eventos, estes simulam apenas um dado evento extremo, sendo aplicado principalmente para a análise da resposta de uma bacia hidrográfica por meio da vazão em seu exutório. A duração deste evento pode variar de algumas horas a poucos dias (USACE, 2000).

O fato de ser orientado apenas por um evento torna o sistema modelado inapto a simular diferentes eventos com características específicas idênticas a do primeiro, pois o mesmo não considera, por exemplo, mudanças na umidade inicial do solo que é alterada conforme o período em que o evento ocorre. Em USACE (1994), é relatado que o mesmo acontece com o balanço hídrico, visto que não é completamente estudado neste tipo de simulação. A modelagem orientada por eventos traz uma abordagem mais simples em relação à determinação dos parâmetros que representam todos os processos dentro do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.

2.4 HEC-HMS

A maioria dos modelos da família HEC foi desenvolvida em linguagem FORTRAN e, apesar do grande potencial, tinham como limitações as complexidades nas entradas de dados e as deficiências em recursos gráficos. Com a evolução dos recursos computacionais e o advento de linguagens visuais como o DELPHI, VISUAL BASIC, VISUAL FORTRAN, JAVA e outros, os programas existentes foram enriquecidos nas entradas de dados e na elaboração dos resultados. Assim, na Tabela 1, pode-se visualizar os modelos da família HEC com sua nomenclatura original, a atual e sua respectiva função:

Tabela 1 – Principais modelos matemáticos da família HEC.

Nomenclatura original	Nomenclatura atual	Função
HEC-1	HEC-HMS	Modelagem de bacias hidrográficas para eventos de chuvas com aplicações em estudos de cheias
HEC-2	HEC-RAS	Problemas de simulação de linhas de água em rios e canais para estudo de planícies de inundação
HEC-3	HEC-ResSim	Problemas de operação e dimensionamento de sistemas de reservatórios
HEC-4	-	Modelos estocásticos
HEC-5	HEC-ResSim / HEC-RAS	Sistemas de reservatórios e qualidade de águas
HEC-6	HEC-RAS	Transporte e deposição de sedimentos

Fonte: Adaptado de Campos (2009).

O modelo HEC-HMS (*Hydrological Engineering Center - Hydrologic Modeling System*), utilizado neste trabalho, é um modelo matemático discreto, concentrado, empírico/conceitual e determinístico (USACE, 2000), desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *US Army Corps of Engineers* (USACE) e disponibilizado gratuitamente na rede mundial de computadores. A versão disponível utilizada neste estudo foi o HEC-HMS 4.2.

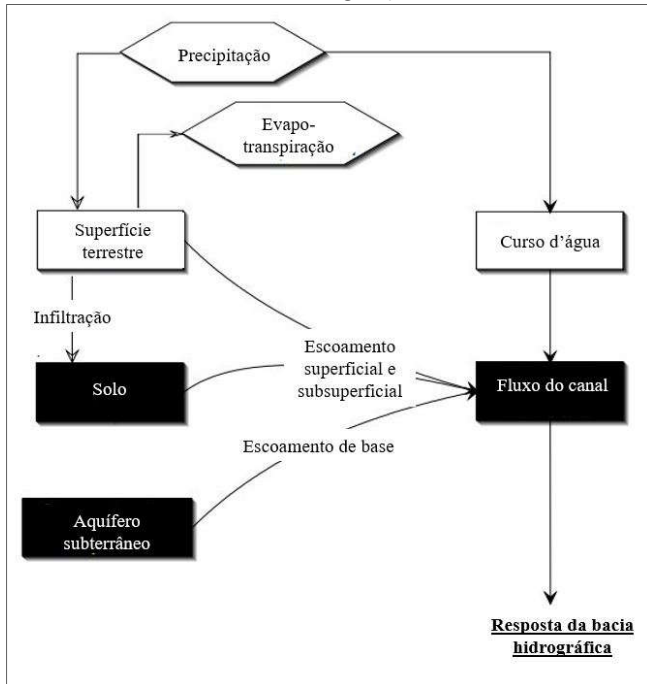
Este modelo foi desenvolvido com objetivo de simular o processo de chuva-vazão em bacias hidrográficas (USACE, 2000). O modelo gera hidrogramas e informações referentes ao volume de escoamento, vazão de pico e tempo de escoamento, com base nas simulações dos processos hidrológicos. Ainda, esse modelo apresenta como vantagem a utilização de poucos parâmetros na calibração, bem como a adoção de diferentes combinações de vários métodos para representar os processos hidrológicos em diferentes locais e sob as mais diversas condições.

Estas informações podem ser aplicadas em diversos estudos de drenagem urbana, previsão de vazões, impacto da urbanização, dimensionamento de vertedores em barragens, áreas de inundações, entre outros (USACE, 2015a).

Quando o objetivo de um estudo é determinar a área suscetível a inundação relacionada a um evento extremo selecionado, não é necessária

uma consideração detalhada da quantidade de água armazenada nas camadas do solo. Em vez disso, o modelo precisa apenas computar e relatar o pico, o volume, ou o hidrograma do exutório da bacia hidrográfica. Assim, neste e em outros casos semelhantes, a visão do processo hidrológico pode ser um pouco mais simples (Figura 4).

Figura 4 – Processos relacionados com a geração de vazão no exutório da bacia.



Fonte: Adaptado de USACE (2000).

Então, apenas os componentes necessários para prever o escoamento superficial são representados em detalhe, e outros componentes são omitidos ou agrupados. Por exemplo, numa aplicação comum, o movimento da água dentro do solo pode ser omitido. Nesta simplificação, o programa é configurado para incluir a infiltração do solo na superfície, mas não modela o armazenamento e o movimento da água verticalmente nas camadas de solo. Ele combina de forma implícita o fluxo das camadas do solo com a superfície próxima e calcula tudo como escoamento direto. Não detalha um fluxo subterrâneo específico,

representando apenas a saída combinada como escoamento de base (USACE, 2000).

2.4.1 Funcionamento conceitual

O HEC-HMS, versão 4.2, é constituído por seis grandes componentes de gerenciamento: de bacia, meteorológico, de especificações de controle, de dados de séries temporais, de dados em pares e de dados em grade.

Com o uso correto de cada componente é possível inserir as condições iniciais, condições de contorno e os parâmetros de entrada necessários para modelagem hidrológica. O componente fundamental é o de gerenciamento de bacia, visto que, a partir dele, é definida a representação física desta. Dentro deste, podem ser implementados e conectados os elementos hidrológicos conceituais que irão reproduzir os processos hidrológicos ao longo do tempo e espaço. São eles:

Tabela 2 – Descrição das funções dos elementos hidrológicos conceituais.

Elemento hidrológico	Função
Sub-bacia	Representa fisicamente a bacia hidrográfica com atributos de área, inserção de condições iniciais e parâmetros de entrada.
Trecho de canal	Transporta escoamento das sub-bacias, em direção a jusante, até que chegue ao exutório.
Junção	Combina escoamentos de diferentes elementos hidrológicos localizados a montante.
Fonte	Introduz escoamento para dentro da bacia hidrográfica.
Exutório	Representa o fim do escoamento da bacia hidrográfica, isto é, o local onde a vazão é transportada para fora da área de estudo.
Reservatório	Representa a detenção e atenuação do escoamento ao longo do tempo e espaço.
Desvio	Transporta o escoamento para fora do canal principal.

Fonte: Adaptado de USACE (2015b).

Assim, o modelo HEC-HMS fornece os elementos hidrológicos conceituais para construir o modelo da bacia e um conjunto de métodos hidrológicos para computações em cada elemento, que tem uma combinação única de processos e definições de parâmetros (CASTRONOVA e GOODALL, 2013).

Quanto ao componente de gerenciamento meteorológico, este insere as condições iniciais e os dados de entrada como a precipitação, derretimento de neve e a evapotranspiração. O componente de gerenciamento de especificações de controle permite incluir a data e horário de início e fim da modelagem, bem como o intervalo de tempo para efetuar os cálculos na transformação da chuva em vazão, sendo capaz de implementar as condições de contorno da simulação (USACE, 2015b).

Quanto aos componentes de gerenciamento de dados de séries temporais, dados pareados e dados em *grid*, estes são utilizados para o funcionamento dos componentes anteriores. Os componentes de gerenciamento de dados de séries temporais e dados em *grid* são definidos com períodos fixos de tempo e o de dados pareados com um número limitado de pontos, por exemplo, para representar uma curva ou ser interpolados quando necessários (USACE, 2015b).

O processo chuva-vazão dentro do modelo HEC-HMS 4.2 é dividido em quatro saídas ou resultados, que são relacionados na Tabela 3 com os cálculos e métodos disponíveis para o usuário simular os processos hidrológicos correspondentes. O cálculo do volume de escoamento por meio da chuva efetiva (perdas), transformação de escoamento superficial direto em vazão, separação do escoamento de base e propagação da onda de cheia são realizados de acordo com os parâmetros considerados por cada.

Tabela 3 – Cálculos, métodos disponíveis e resultados do HEC-HMS.

Cálculos	Métodos disponíveis	Resultados do modelo
Interceptação	Dossel simples	Volume de escoamento
	Dossel dinâmico	
Superfície	Superfície simples	
	Taxa com déficit e constante	
Perdas	Perda exponencial	
	<i>Green and Ampt</i>	
	Taxa inicial e constante	
	<i>Curve Number</i> - SCS-CN	
	<i>Smith Parlange</i>	
	<i>Soil Moisture Accounting (SMA)</i>	
Transformação	HU - <i>Clark</i>	Transformação de escoamento direto, incluindo superficial e subsuperficial, em vazão
	Onda cinemática	
	<i>ModClark</i>	
	HU - <i>Snyder</i>	
	HU - SCS	
	<i>S-graph</i> especificado pelo usuário	
Escoamento de base	HU especificado	Separação do escoamento subterrâneo
	Recessão limitada	
	Constante mensal	
	<i>Boussinesq</i> não-linear	
Propagação	Reservatório linear	Propagação de escoamento ou onda de cheia ao longo do canal
	Recessão exponencial	
	Onda cinemática	
	<i>Lag</i>	
	<i>Puls</i> modificado	
	<i>Muskingum</i>	
Perda/Ganho do canal	<i>Muskingum-Cunge</i>	
	<i>Straddle Stagger</i>	
	<i>Constante</i>	
	<i>Percolação</i>	

Fonte: Adaptado de USACE (2000).

2.4.2 Métodos de cálculo empregados

Com a possibilidade de dividir a bacia em várias sub-bacias, o modelo permite observar as diferenças na vazão causada por cada uma delas, de acordo com a ordem dos métodos de cálculo empregados. Para tanto, são calculadas as perdas por infiltração e transformada a precipitação efetiva em vazão, além de ser decomposto o escoamento de base. Posteriormente, o modelo calcula a propagação de onda no canal, de modo a obter a vazão total para a bacia hidrográfica, o que aumenta a exatidão da vazão calculada (USACE, 2000).

2.4.2.1 Perdas: Cálculo da chuva efetiva

Infiltração, interceptação, armazenamento, evaporação e transpiração são referidos coletivamente como perdas no modelo. Portanto, o HEC-HMS calcula o volume de escoamento computando o volume de água que é infiltrada, interceptada, armazenada, evaporada ou transpirada e subtraindo-o da precipitação. A infiltração representa o movimento da água sob a superfície terrestre. A interceptação e o armazenamento de superfície são destinados a representar o armazenamento superficial de água nas árvores, grama, depressões locais na superfície do solo, fissuras ou fendas em superfícies impermeáveis como uma rua, estacionamento ou telhados, ou ainda em superfícies onde a água não é livre para se mover (USACE, 2000).

Com o objetivo de gerar o volume de escoamento de toda a bacia hidrográfica, o cálculo das perdas é denominado assim por representar as perdas que ocorrem durante um evento de chuva. Para cada passo de tempo da simulação, o cálculo de perdas verifica o volume de água que contribui para vazão no exutório, ou seja, aquela proveniente da chuva efetiva.

O método de cálculo da perda empregado neste trabalho foi o SCS *Curve Number* (CN) desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS), atual *Natural Resources Conservation Service* (NRCS). Tal método estima a chuva efetiva como uma função da chuva acumulada, do uso e ocupação do solo, do tipo de solo e da condição de umidade antecedente do solo (NRCS, 2004). Desenvolvido com base na análise de um grande número de bacias monitoradas nos EUA, o CN é utilizado como parâmetro único de caracterização da bacia ao quantificar a capacidade de infiltração do solo da bacia.

Teoricamente, o CN é um índice adimensional baseado no grupo hidrológico, uso e cobertura, condições hidrológicas e condições

anteriores de umidade dos solos das sub-bacias. O CN varia de 0, quando 100% da chuva infiltra no solo da bacia, a 100, quando 0% da chuva infiltrou no solo da bacia. Assim, valores altos indicam sub-bacias com áreas mais impermeabilizadas e que provocam escoamento imediato provindo da chuva efetiva e valores baixos indicam o papel relevante da infiltração na sub-bacia. A equação 1 demonstra como o método SCS-CN calcula o volume de escoamento da área de captação da bacia.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

onde, Q representa o escoamento superficial direto (mm), P a chuva (mm), S a retenção máxima potencial após o escoamento começar (mm) e I_a a abstração inicial, que corresponde a todas as perdas que ocorrem antes de o escoamento superficial iniciar.

A abstração inicial ainda inclui a água retida nas depressões, assim como a interceptada pela vegetação, o volume que evaporou e o que infiltrou (NRCS, 1986). Logo, no método do SCS-CN é assumida a seguinte relação:

$$I_a = 0,2 \times S \quad (2)$$

A retenção máxima potencial S também é relacionada com o tipo e uso e ocupação do solo por meio da seguinte equação:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

No modelo HEC-HMS, o incremento de chuva efetiva para cada passo de tempo da simulação é calculado como a diferença entre o volume excedente no fim e no início de cada intervalo. O volume excedente caracterizado como a chuva efetiva é calculado por meio da seguinte equação 4 referente ao SCS-CN:

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{P + 0,8 \times S} \quad (4)$$

onde, P indica a precipitação, P_e indica a chuva efetiva ou excedente e S a retenção máxima potencial.

Quanto aos parâmetros de entrada a serem fornecidos para cada sub-bacia de estudo no modelo são três:

- Abstração inicial (mm);
- *Curve Number* - CN;
- Porcentagem de área impermeável (%).

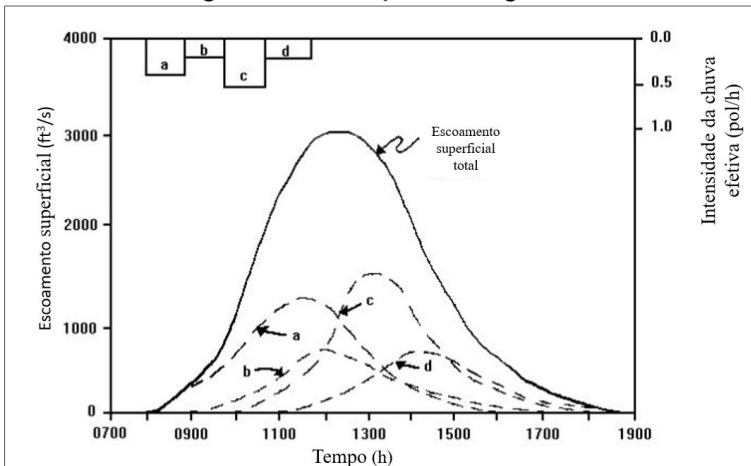
Conforme detalhamento anterior, os parâmetros a serem inseridos podem ser provenientes de mapas de uso e ocupação do solo e de tipos de solo, que tem relação com condição específica de umidade antecedente de cada tipo de solo.

2.4.2.2 Transformação: Chuva-vazão

A partir do propósito de converter a chuva efetiva, capturada anteriormente, no hidrograma do exutório da bacia, o cálculo da transformação reproduz o processo chuva-vazão dentro da bacia.

Normalmente, a transformação da chuva efetiva ou excedente em vazão é realizada por meio de um Hidrograma Unitário (HU). O HU é definido como um hidrograma de escoamento superficial resultante da chuva efetiva de uma unidade de tempo, produzido uniformemente no espaço e no tempo na bacia hidrográfica (SHERMAN, 1942). Na Figura 5, encontra-se a convolução de um hidrograma para os eventos a, b, c e d, e além disso, pode-se perceber implícito o tempo de retardo ou *Lag time* (T_L) entre o bloco de precipitação e seu respectivo pico.

Figura 5 – Convolução de hidrogramas.

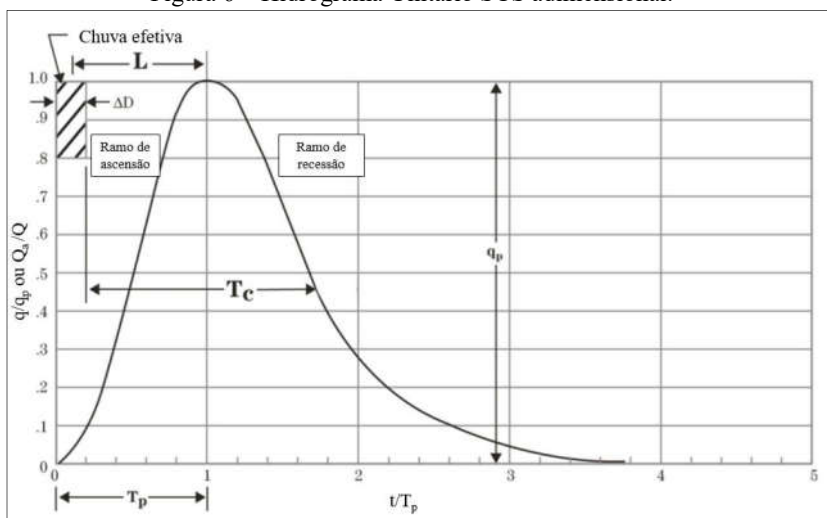


Fonte: Adaptado de USACE (1994).

Para bacias não monitoradas ou com baixa densidade de estações fluviométricas e pluviométricas se faz necessário o uso de HU's sintéticos como é o caso do cálculo da transformação empregado neste trabalho: o SCS (atual NRCS) *Unit Hydrograph* (SCS-UH), descrito na Figura 6, que se baseia em HU's médios gerados a partir de um grande número de bacias monitoradas nos EUA. O fato de o sistema Caveiras Montante 1 não possuir medições simultâneas do par chuva e vazão, leva à necessidade de sua utilização. São consideradas algumas hipóteses fundamentais como:

- Chuvas efetivas distribuídas uniformemente pela bacia;
- Chuvas efetivas com intensidade constante ao longo de cada intervalo de tempo;
- Princípio da linearidade, isto é, duas chuvas com a mesma duração, têm o mesmo tempo de base, independentemente de sua intensidade;
- E o princípio da invariância com o tempo, ou seja, não se considera os efeitos de sazonalidade e diferentes condições antecedentes.

Figura 6 – Hidrograma Unitário SCS adimensional.



Fonte: Adaptado de NRCS (2004).

Na figura 6, observa-se o Q_a/Q como o volume de escoamento no tempo t dividido pelo volume de escoamento total (mm), o q/q_p como a taxa de vazão no tempo t dividido pela vazão no T_p , T_c o tempo de concentração, T_p o tempo para o pico, t/T_p a taxa adimensional de qualquer tempo até o T_p e ΔD a duração da precipitação efetiva.

Portanto, na modelagem hidrológica com o HEC-HMS se faz necessária a indicação dos parâmetros do hidrograma de acordo com USACE (1998). O tempo de pico pode ser relacionado com a duração da precipitação efetiva, que também se trata do passo de tempo da simulação. O tempo de concentração (T_c) da bacia é definido como o tempo necessário para o escoamento do ponto mais distante da bacia chegar até seu exutório. Quanto ao tempo de retardo (T_L) da bacia, é definido como a diferença de tempo entre o centro de massa da chuva efetiva e o tempo para o pico do HU.

As equações utilizadas para determiná-los são inúmeras, entretanto as escolhidas para aplicação neste trabalho foram aquelas indicadas para uso com o HEC-HMS, sendo a equação 6 baseada nas características das sub-bacias de estudo (DNIT, 2005) e a equação 5 e 7 de acordo com a própria formulação no manual do modelo (USACE, 1998):

$$T_p = \frac{\Delta D}{2} + T_L \quad (5)$$

$$T_c = 0,3 \times \left(\frac{L}{I^{\frac{1}{4}}} \right)^{0,76} \quad (6)$$

$$T_L = 0,6 \times T_c \quad (7)$$

onde, T_p indica o tempo para ocorrência do pico (unidade do passo de tempo), T_c o tempo de concentração (horas), T_L o tempo de retardo ou *lag time* (unidade do passo de tempo), I representa a declividade (%) e L o comprimento do trecho de canal (km).

O parâmetro de entrada a ser fornecido para o modelo computar o processo chuva-vazão, por meio do SCS-UH, é apenas um:

- Tempo de retardo ou *lag time* - T_L (min).

Este parâmetro pode ser estimado com o uso da equação 7 para todas as sub-bacias de estudo. Observando-se o vínculo forte adotado entre o tempo de retardo e o tempo de concentração, deve-se atentar para

os tempos de concentração encontrados para o presente trabalho. As chuvas com duração inferior ao tempo de concentração, geram contribuições apenas de parte da bacia que se somam para formar o hidrograma de cheia, enquanto que, para chuvas de duração maior que o tempo de concentração das sub-bacias, as contribuições de todas as partes da bacia estão contribuindo para o evento, embora com o pico de cheia já atenuado (DNIT, 2005).

2.4.2.3 Escoamento de base

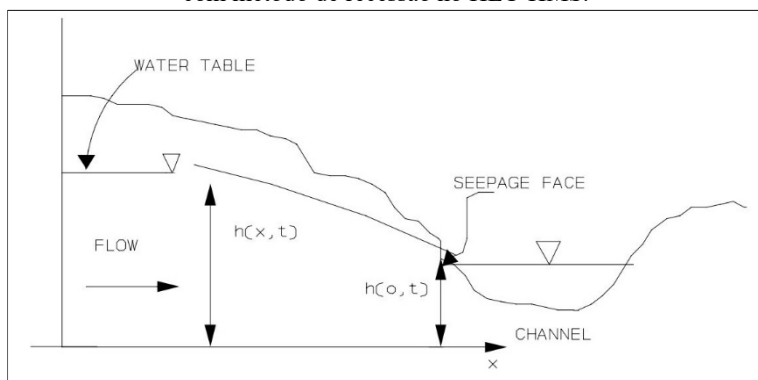
Tendo por base o objetivo de decomposição do escoamento subterrâneo dos escoamentos superficial e subsuperficial calculados anteriormente, o cálculo do escoamento de base busca simular a fração do escoamento no canal contribuída pelo lençol freático.

O método de cálculo do escoamento de base empregado neste trabalho foi o de recessão exponencial, pois possui base empírica assim como os anteriores, sendo indicado para modelagem orientada por eventos (USACE, 1994). Tal método pode se redefinir automaticamente após cada evento selecionado de chuva e por isso pode ser usado para simulação contínua também, entretanto destina-se principalmente à simulação de eventos, visto que possui base empírica.

A recessão do hidrograma é dominada pelo escoamento subterrâneo no ponto em que cessa o escoamento direto superficial e subsuperficial. A identificação do ponto em que o escoamento direto cessa é realizada ao se aproximar o comportamento típico observado em bacias hidrográficas monitoradas nos EUA quando a vazão do canal recua exponencialmente após um evento.

Deste modo, o método de recessão exponencial do escoamento de base trata a separação ou decomposição do hidrograma em escoamento direto e subterrâneo. Na Figura 7, pode-se perceber a consideração do escoamento subterrâneo com fluxo em direção paralela à declividade da superfície:

Figura 7 – Representação simplificada do escoamento subterrâneo para análise com método de recessão no HEC-HMS.



Fonte: USACE (1994).

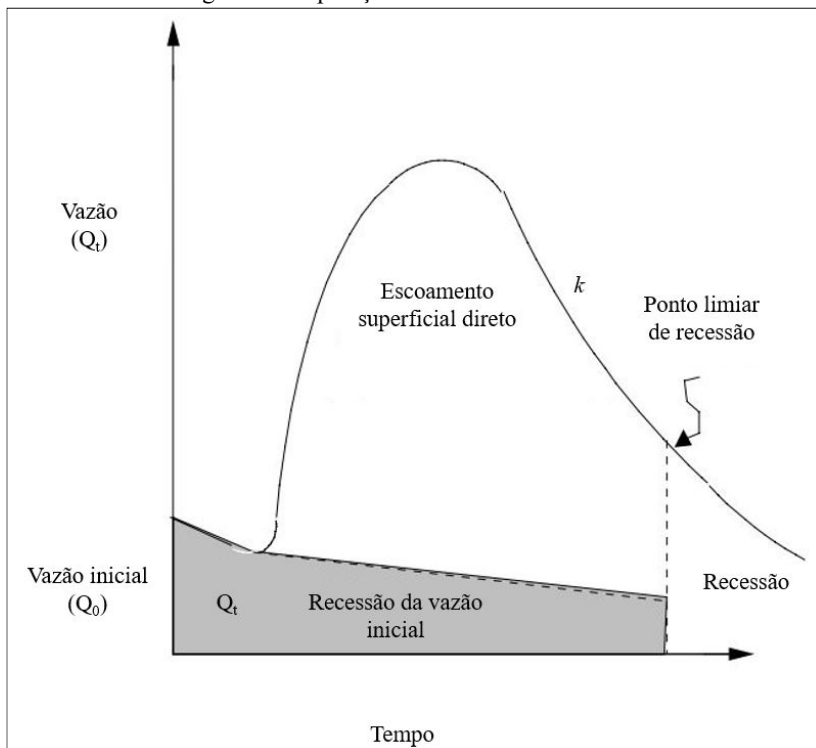
onde, identifica-se $h(x, t)$ como a profundidade da superfície freática em função da interface entre o canal e a superfície terrestre, e nesse sentido, indica-se x como a profundidade em um instante t antes de o escoamento de base contribuir para o canal e 0 um instante t quando o canal já é abastecido pelo escoamento de base.

Para aplicação deste método o primeiro parâmetro a se determinar foi o ponto em que o decaimento exponencial do escoamento superficial e subsuperficial inicia a recessão propriamente dita (limiar). Em seguida, foi realizada a caracterização do grau de recessão do ramo descendente do hidrograma e a determinação da vazão do canal no início da simulação. Esses três parâmetros são transmitidos e melhor explanados na Figura 8 e equação 8:

$$Q_t = Q_0 \times K^t \quad (8)$$

onde, Q_t é a vazão subterrânea, Q_0 a vazão média do canal antes do início de um evento, K a constante de recessão, definida como a razão entre o escoamento de base no tempo t e o escoamento de base no dia anterior, e t o passo de tempo da simulação. Para suas determinações, em cada uma das sub-bacias de estudo, foram analisadas as séries históricas relacionadas com os eventos selecionados. Ainda, pode-se perceber no hidrograma, o limiar onde a recessão inicia, ou seja, quando somente o escoamento subterrâneo contribui para a vazão do canal.

Figura 8 – Separação do escoamento de base.



Fonte: Adaptado de USACE (1994).

Portanto, os parâmetros de entrada a serem definidos no modelo HEC-HMS para o método de recessão exponencial são três:

- Vazão inicial do trecho de canal (m^3/s);
- Constante de recessão;
- Vazão do ponto limiar de recessão (m^3/s).

Por fim, o modo como o hidrograma de escoamento de base é computado no HEC-HMS ocorre por meio de um ordenamento específico. Primeiro, existe a determinação do ramo de ascensão do hidrograma de escoamento de base, que é realizada a partir da vazão inicial específica indicada e a constante de recessão especificada. Em seguida, enquanto a vazão calculada é identificada como sendo menor do que a vazão limiar de recessão, o ramo de recessão é determinado da

mesma maneira. A partir do passo de tempo em que o valor limiar de recessão do hidrograma de escoamento superficial é alcançado pela vazão do hidrograma de escoamento de base, é calculada a vazão utilizando a equação 8 (USACE,1994).

Ao realizar uma boa calibração do hidrograma calculado, podem ser estabelecidos hidrogramas de escoamento de base para as sub-bacias sem monitoramento ao transferir os parâmetros e resultados.

2.4.2.4 Propagação de onda nos canais

O movimento de uma onda de cheia através de um canal no modelo HEC-HMS é simulado por meio do cálculo de propagação de onda. Tal procedimento matemático é definido com o objetivo de prever mudanças na magnitude, velocidade e forma com que uma onda de cheia se transporta ao longo de um curso d'água no tempo e no espaço (CHOW *et al.*, 1988).

Quando a bacia hidrográfica se divide em sub-bacias, a vazão do exutório de uma sub-bacia a montante deve ser propagada ou transportada através do canal principal até a sub-bacia de jusante (USACE, 2000). Para simular tal processo, o método de propagação empregado neste trabalho foi o *Muskingum-Cunge*, o qual computa o hidrograma de jusante com base no hidrograma de montante como condição de contorno, ao resolver equações básicas de escoamento de canais abertos.

O método de *Muskingum-Cunge* é uma das soluções da equação da difusão e baseia-se nas equações de difusão da onda que provém das equações do momento e da continuidade. A equação da continuidade é derivada da lei de conservação da massa e calcula o volume de água em um trecho de canal aberto, ao somar a água que escoo pelo trecho do canal, a água saindo deste trecho e a água armazenada no mesmo. Chow *et al.* (1988) apresenta no método de *Muskingum-Cunge* a aproximação pelo método das diferenças finitas da equação da continuidade:

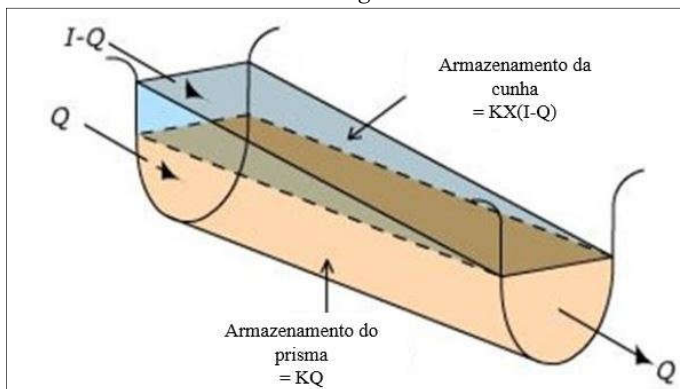
$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) - \left(\frac{Q_{t-1} + Q_t}{2}\right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{t}\right) \quad (9)$$

onde, I representa a entrada do escoamento em determinado trecho, Q a saída do escoamento do trecho, S o armazenamento no trecho e t o passo de tempo da simulação.

Buscando desenvolver a equação 9, pode-se incluir conceitos do método de *Muskingum*. O armazenamento que ocorre no trecho de um canal pode ser denominado como a soma entre o armazenamento em um

prisma, definido como o volume de água até o perfil onde se obtém escoamento permanente, e a “cunha” que se trata do volume restante de água definido pelo perfil onde ocorre a onda de cheia (Figura 9):

Figura 9 – Armazenamento aproximado de acordo com o método de *Muskingum*.



Fonte: Chow *et al.* (1988).

onde, o K representa o tempo de trânsito no trecho do canal e X a constante de ponderação do armazenamento tanto para reservatórios como canais, que é o caso do volume da “cunha”. Deste modo, com base na Figura 9, o volume de armazenamento total entre as seções de montante e jusante deste trecho, em um determinado passo de tempo t :

$$S_t = K\{XI_t + (1 - X)Q_t\} \quad (10)$$

A determinação do K e X para o método *Muskingum-Cunge*, de acordo com Chow *et al.* (1988), é realizada por meio das seguintes equações:

$$K = \frac{x}{c} \quad (11)$$

$$X = \left(1 - \frac{Q_0}{B S_0 c x}\right) \quad (12)$$

onde tem-se x como o comprimento entre a seção de montante e jusante do trecho do canal, c a velocidade da onda de cheia, estando relacionada com a geometria da calha do canal, Q_0 a vazão de referência do

hidrograma de montante, B a largura superior da área transversal do canal e S_0 a declividade da calha do canal.

Isolando as variáveis que são desconhecidas no passo de tempo t e unindo a equações 9 e 10, pode-se obter:

$$Q_t = \left(\frac{t-2KX}{2K(1-X)+t} \right) I_t + \left(\frac{t+2KX}{2K(1-X)+t} \right) I_{t-1} + \left(\frac{2K(1-X)-t}{2K(1-X)+t} \right) Q_{t-1} \quad (13)$$

Por fim, no modelo HEC-HMS a equação 13 é resolvida para cada passo de tempo t , buscando computar o hidrograma do trecho de jusante para uma dado hidrograma de trecho de montante (USACE, 2000). Ainda, a maioria das variáveis de cálculo dos parâmetros de entrada para o método *Muskingum-Cunge* são automatizados. Os seis parâmetros de entrada, a serem definidos para cada trecho de canal inserido, são:

- Largura média do trecho de canal - B (m);
- Comprimento do canal - x (m);
- Geometria da seção transversal;
- Declividade do trecho - S_0 (m/m);
- Declividade dos taludes laterais (H:V);
- Rugosidade da calha do canal (coeficiente de *manning* - n).

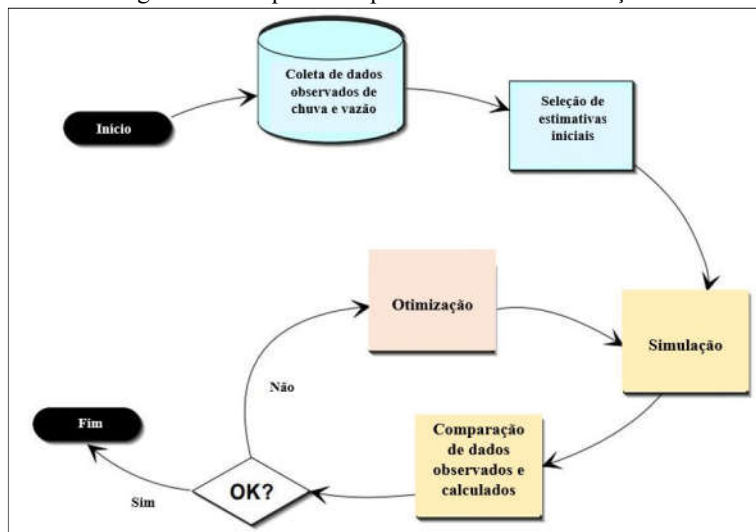
Os parâmetros a serem inseridos podem ser provenientes de Modelo Digital de Terreno (MDT), fotografias aéreas, verificação *in loco* e bibliografia adequada.

2.4.3 Avaliação dos resultados

A calibração utiliza dados hidrometeorológicos observados numa pesquisa sistemática de parâmetros que proporcionam o melhor ajuste dos resultados gerados ao escoamento observado. Também denominada como otimização (USACE, 2000), tal procedimento busca valores de um ou mais parâmetros, proporcionando o melhor resultado para uma função destas variáveis.

Na modelagem hidrológica a calibração é aplicada iterativamente para ajustar os valores dos parâmetros do modelo até que os resultados calculados coincidam, aceitavelmente, aos dados observados (COLLISCHONN; TUCCI, 2003). Assim, o procedimento de calibração pode ser melhor ilustrado na Figura 10:

Figura 10 – Esquema do procedimento de calibração.



Fonte: Adaptado de USACE (2000).

Conforme aponta a Figura 10, o procedimento de calibração inicia com a coleta de dados, as melhores estimativas possíveis para os parâmetros, em seguida, a simulação do escoamento calculado, e por fim, a otimização, até que os hidrogramas encontrados estejam adequados e representem o comportamento hidrológico das sub-bacias e rios estudados.

De acordo com USACE (2000), ao serem utilizados os métodos de cálculo com as condições de contorno observadas, como as medições de chuva na área de estudo e os dados de vazão de montante ou jusante da área de estudo, os possíveis resultados a serem gerados são os hidrogramas de escoamento das sub-bacias de estudo e de jusante dos trechos de canais inseridos na modelagem.

Ainda, existem restrições intrínsecas no HEC-HMS (Tabela 4) que são impostas para calibração, as quais são os limites de cada um dos parâmetros que podem ser calibrados:

Tabela 4 – Limites para parâmetros de calibração já incluídos no HEC-HMS.

Método de cálculo	Parâmetro	Limite Mínimo	Limite Máximo
Perdas – <i>SCS Curve Number</i>	CN	1	100
Transformação - <i>SCS Unit Hydrograph</i>	Tempo de Retardo (min)	0.1	30000
	Vazão Inicial (m ³ /s)	0	100000
Escoamento de base - <i>Recession</i>	Constante de Recessão - k	0,000011	-
	Limiar de Recessão (m ³ /s)	0	-
Propagação - <i>Muskingum-Cunge</i>	Manning - n	0	1

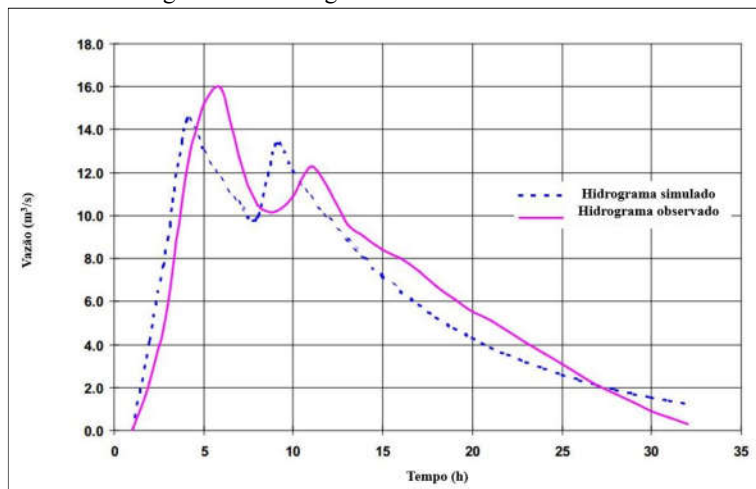
Fonte: Adaptado de USACE (2000).

A adequação dos resultados encontrados está totalmente ligada à pesquisa sistemática da otimização dos parâmetros, que depende de dois índices importantes que serão abordados a seguir.

2.4.3.1 Índices de qualidade dos ajustes

Para comparar um hidrograma simulado com um hidrograma observado (Figura 11), faz-se necessário um índice de qualidade dos ajustes, isto é, que possui capacidade de qualificar os ajustes como ótimos ou não. Os algoritmos indicadores de qualidade para os ajustes realizados durante a fase de otimização são denominadas funções-objetivo (USACE, 2000).

Figura 11 – Hidrogramas observado e simulado.



Fonte: Adaptado de USACE (2000).

O propósito de todas as funções-objetivo é encontrar parâmetros razoáveis ou ótimos que indiquem o melhor desempenho de acordo com suas formulações. Entre as diversas funções-objetivo existentes para a modelagem hidrológica, foram determinadas aquelas que se adequam melhor à natureza do problema (BEVEN, 2001). Deste modo, de acordo com Nash e Sutcliffe (1970) e Krause *et al.* (2005) foram utilizados o *Nash-Sutcliffe Efficiency Index* (NSE) ou coeficiente de NSE e o coeficiente de determinação r^2 .

O índice de eficiência NSE avalia o desempenho do modelo em comparação com os dados observados. Quanto maior é o índice, variando de $-\infty$ a 1, melhor é a qualidade dos ajustes que representam o desempenho final do modelo. Ou seja, melhor se adequam os valores simulados com os valores observados. No caso do modelo HEC-HMS, a vazão é a variável que orienta a qualidade do desempenho do modelo, sendo expressa por meio do coeficiente de NSE da seguinte forma:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q(t)_{obs} - Q(t)_{sim})^2}{\sum_{t=1}^N (Q(t)_{obs} - \overline{Q(t)_{obs}})^2} \quad (14)$$

onde *NSE* é o coeficiente de Nash e Sutcliffe, $Q(t)_{obs}$ representa a vazão observada no tempo t , $Q(t)_{sim}$ é a vazão simulada no tempo t , $\overline{Q(t)_{obs}}$ é a vazão média da série observada.

Alguns autores indicam o uso do coeficiente de NSE para avaliação de vazões simuladas em eventos extremos, assim como em bacias hidrográficas com uma dinâmica rápida, devido à normalização da variância dos dados observados (ARNOLD *et al.*, 2012; KRAUSE *et al.*, 2005). Deste modo, o uso do coeficiente de NSE para avaliar o desempenho se justifica para a representação de eventos extremos isolados.

Quanto ao coeficiente de determinação r^2 , esta função-objetivo pode ser expressa como a razão quadrática entre a covariância e os desvios-padrão multiplicados dos valores observados e previstos. Portanto, estima-se a dispersão combinada contra a dispersão única das séries observadas e previstas (KRAUSE *et al.*, 2005). O intervalo de r^2 situa-se entre 0 e 1, o que descreve o quanto do observado é explicado pela simulação. O valor de 0 significa nenhuma correlação, enquanto que o valor de 1 significa que o simulado é igual ao observado.

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{t=1}^N ((Q(t)_{obs} - \overline{Q(t)_{obs}})(Q(t)_{sim} - \overline{Q(t)_{sim}}))}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Q(t)_{obs} - \overline{Q(t)_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N (Q(t)_{sim} - \overline{Q(t)_{sim}})^2}} \right)^2 \quad (15)$$

onde r^2 é o coeficiente de determinação, $Q(t)_{obs}$ representa a vazão observada no tempo t , $Q(t)_{sim}$ é a vazão simulada no tempo t , $\overline{Q(t)_{obs}}$ é a vazão média da série observada e $\overline{Q(t)_{sim}}$ é a vazão média da série simulada.

Krause *et al.* (2005) explica que se trata de um índice estatístico que sistematicamente pode subestimar ou superestimar os parâmetros encontrados e mesmo assim resultar em valores adequados, próximo de 1. Assim, o fato de apenas a dispersão ser quantificada é uma das principais desvantagens do r^2 se for considerado isolado. Portanto, com o objetivo de assegurar que todas as simulações realmente aproximam-se das vazões observadas, no caso da modelagem hidrológica, realiza-se o uso de mais índices de qualidade de ajuste.

Por fim, o coeficiente de determinação r^2 se mostra com utilidade similar ao coeficiente de NSE. Entretanto, a principal diferença é o propósito com que são utilizados e isso justifica como essencial o uso complementar de ambos. O coeficiente de determinação r^2 mensura a qualidade do ajuste de uma estatística, enquanto que o coeficiente de NSE busca quantificar o quão bem uma simulação pode prever uma variável observada. Quando ambos apresentam valores razoáveis ou ótimos, a

calibração pode ser considerada estatisticamente confiável e ideal para previsão de eventos hidrológicos do mesmo porte do calibrado.

Atribuídas as funções-objetivo, o procedimento de calibração pode ser manual, quando fica a cargo do hidrólogo a decisão pela alteração nos valores dos parâmetros de acordo com o desempenho do modelo. E ainda, pode ser realizada a calibração automática por meio dos métodos iterativos, com o propósito de atingir mais rapidamente a otimização dos parâmetros ou ainda aperfeiçoar uma calibração manual feita previamente.

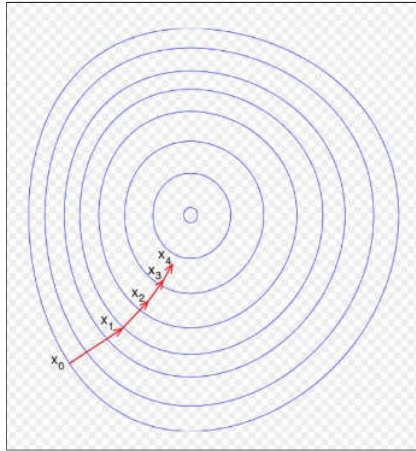
2.4.3.2 Métodos iterativos para calibração automática

A pesquisa realizada por meio da execução de algoritmos de calibração automática refere-se aos chamados métodos iterativos. No HEC-HMS após a escolha de um método iterativo, os parâmetros são selecionados, os métodos de cálculo são executados e o erro é calculado de acordo com as funções-objetivo. Se o erro for inaceitável, o programa altera os parâmetros de teste e reitera.

As decisões sobre as alterações dependem do algoritmo de pesquisa escolhido: *Univariate-Gradient Search Algorithm* e *Nelder and Mead Simplex Search Algorithm*. A característica essencial de ambos os algoritmos de pesquisa é a inclusão da aleatoriedade na busca pela otimização dos parâmetros.

O *Univariate-Gradient Search Algorithm* ou algoritmo de pesquisa de gradiente univariado avalia e ajusta um parâmetro de cada vez, mantendo outros parâmetros constantes (Figura 12). Assim, o algoritmo de gradiente univariado é sempre utilizado, se apenas um parâmetro for escolhido para otimização (USACE, 2015c).

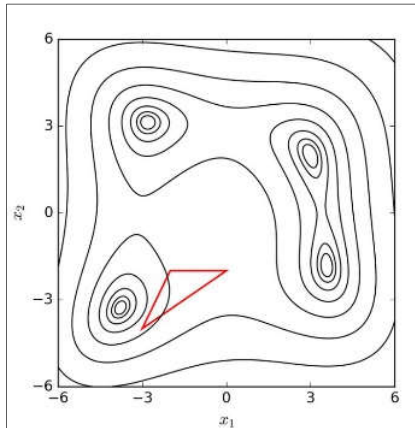
Figura 12 – Exemplo de busca de parâmetro ótimo através do *Univariate-Gradient Search Algorithm*.



Fonte: Kundzewicz (1990).

Quanto ao algoritmo de pesquisa *Nelder and Mead Simplex Search Algorithm* ou simplesmente algoritmo de pesquisa Nelder-Mead, de acordo com USACE (2015c), avalia todos os parâmetros simultaneamente (Figura 13) e determina qual parâmetro ajustar.

Figura 13 - Exemplo de busca de parâmetro ótimo através do *Nelder and Mead Simplex Search Algorithm*.



Fonte: Kundzewicz (1990).

Portanto, ambos funcionam ajustando iterativamente os valores dos parâmetros para melhorar o valor da função-objetivo. Para o controle dos algoritmos de pesquisa, ainda existem os limites das faixas de pesquisa, a tolerância decimal e o número máximo de iterações que determinam a alteração no valor da função-objetivo entre duas iterações sucessivas e realiza a decisão de iterar novamente ou finalizar a pesquisa.

Um fator importante na escolha da calibração automática é conhecer suas limitações e saber quando prosseguir com a calibração manual dos parâmetros. Em USACE (2015c), afirma-se que a busca será interrompida quando a otimização dos parâmetros só continue fora dos limites inseridos, quando a função-objetivo muda menos que a tolerância especificada, ou quando o número máximo de iterações for atingido, tudo isso independentemente das alterações no valor da função-objetivo ou da qualidade dos parâmetros estimados.

2.4.4 Aplicações práticas

O modelo HEC-HMS, previamente denominado HEC-1, tem sido aplicado com sucesso por mais de 30 anos e aceito para uso oficial em diversas situações para a Agência Federal de Gestão de Emergências dos EUA, por exemplo, como a determinação de locais específicos na instalação de canais de drenagem evitando alagamentos durante eventos extremos nos EUA (USACE, 2000).

A seguir, foram reunidas algumas aplicações práticas que avaliaram a ocorrência de inundações utilizando o modelo hidrológico HEC-HMS (NASCIMENTO *et al.*, 2000; CALÇADA; PORTELA; MATOS, 2003; KNEBL *et al.*, 2004; GUL; HARMANCIOGLU; GUL, 2009; OLEYIBLO; LI, 2010; KOUTROULIS; TSANIS, 2010; CONTERATO *et al.*, 2015; NETO; BATISTA; COUTINHO, 2016).

Nascimento *et al.* (2000) realizaram modelagem hidrológica com base na chuva de projeto para diversos períodos de retorno, na bacia de Riacho das Areias, Belo Horizonte (MG). As simulações hidrológicas foram realizadas por meio do modelo HEC-HMS, a partir da seleção do método SCS-CN para determinar a precipitação excedente, o SCS-UH para transformação da precipitação excedente em hidrograma de escoamento superficial e o método Muskingum-Cunge para a propagação da onda de cheia no canal. Os autores observaram que a urbanização em relação a todas as classes de uso do solo produz aumento na vazão de pico que varia 50% para tempos de retorno maiores que 10 anos e 80% para tempos de retorno de 2 e 5 anos. Os estudos desenvolvidos para a prefeitura local objetivaram o diagnóstico da situação atual e as

simulações de funcionamento do sistema de macrodrenagem no horizonte de ocupação urbana da bacia, contemplando ainda o estudo de alternativas de controle de cheias. Os resultados confirmam a inadequação de projeto do sistema de macrodrenagem e o elevado nível de risco de inundação de acordo com o desempenho do modelo.

Caçada, Portela e Matos (2003) aplicaram o modelo HEC-HMS com uso dos métodos de cálculo SCS-CN, SCS-UH e *Muskingum* buscando analisar e delimitar a vazão de cheia para o período de retorno de 100 anos para os rios Comoro e Bebuy, no Timor Leste. Os resultados foram satisfatórios estatisticamente e puderam atribuir uma vazão de cheia para prosseguir com a modelagem hidráulica de áreas inundáveis na área de estudo.

Knebl *et al.* (2004) realizaram modelagem de inundação com tecnologia de SAD, isto é, que integra SIG e o modelo hidrológico HEC-HMS. Trata-se de um estudo de caso para a bacia do rio *San Antonio* no evento extremo do verão de 2002. Ao atribuir uma vazão de cheia para prosseguir com a modelagem hidráulica, foi concluído que a modelagem fornece uma ferramenta adequada para previsões hidrológicas de alargamento em uma escala regional.

Gul, Harmancioglu e Gul (2009) apresentaram uma abordagem sistemática baseada na simulação de algumas condições de eventos extremos, utilizando o modelo HEC-HMS para gerar a vazão de projeto e depois através da modelagem hidráulica, para análise da várzea da bacia hidrográfica de Bostanli, Turquia. Os resultados indicaram que a construção de uma barragem, teria um impacto positivo como medida de controle de inundações, uma vez que parece diminuir os picos de cheias de 68,9 e 158,7 m³/s para 65,5 e 150,7 m³/s, respectivamente, quando a barragem estiver em operação.

Oleyiblo e Li (2010) calibraram o modelo HEC-HMS para previsão das inundações nas bacias de Misai e Wan'an, na China, com áreas de aproximadamente 797 km² e 869 km², respectivamente. Os autores observaram que o modelo previu vazão de pico com precisão ótima, se baseando nos dados históricos disponíveis de inundação. Foi verificado que, tanto o volume de inundação, como os tempos nos hidrogramas eram bastante precisos. Isto mostrou como o HEC-HMS é adequado para a compreensão deste tipo de estudo.

Koutroulis e Tsanis (2010) aplicaram o modelo HEC-HMS para simular a vazão de pico relativa à inundação que ocorreu nos dias 13 e 14 de janeiro de 1994, na bacia de Giofiros, na ilha de Creta na Grécia. Para isso, utilizaram o método de perda de taxa com déficit e constante, o método de Hidrograma Unitário *Clark* para transformação da precipitação

excedente em escoamento superficial e o método de recessão exponencial para determinar o escoamento de base. Os autores constataram que o evento que desencadeou a inundação teve uma precipitação total de 75,5 mm, enquanto o volume escoado e a vazão de pico foi de $5,2 \times 10^3 \text{ m}^3$ e $296 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Deste modo, obteve-se uma modelagem considerada satisfatória e foi concluído que a vazão de pico simulada é confiável reduzindo a incerteza na interpretação do evento.

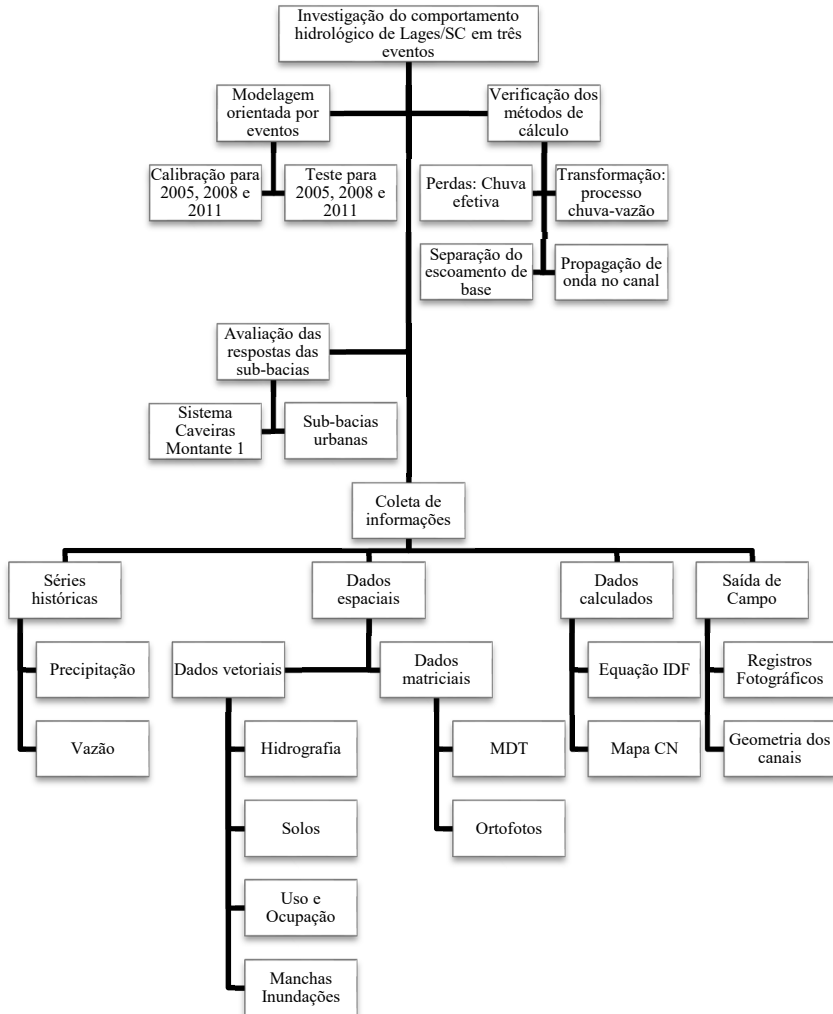
Neto, Batista e Coutinho (2016) realizaram estudos envolvendo vulnerabilidade de cidades a inundações no Ipojuca, em Pernambuco, e que necessitam do mapeamento de perigo e das áreas com potencial para inundação. O objetivo do trabalho foi desenvolver metodologia para mapeamento de indicadores de perigo e áreas inundáveis na escala de município. A primeira metodologia consistiu na simulação hidrológica-hidráulica para o baixo curso do rio Ipojuca com uso dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS. A vazão gerada no modelo hidrológico do tipo chuva-vazão foi utilizada como entrada do modelo hidráulico que simula o perfil da linha d'água no rio para a região de interesse. A outra metodologia procurou identificar as áreas inundáveis de todo o território do município por meio do índice topográfico. Os resultados do estudo em Ipojuca podem ser utilizados para a caracterização do perigo principalmente.

Com base no exposto, os valores dos índices de eficiência não constavam nos trabalhos levantados e isso reforça os objetivos específicos propostos pelo presente trabalho. Até o presente momento não foram encontrados no sul do Brasil trabalhos com o HEC-HMS com abordagem explícita diferenciando simulações contínuas ou por eventos. Deste modo, o estado da arte deste trabalho enquadra-o na literatura como uma nova forma de avaliação dos resultados tradicionais indicados pelo modelo HEC-HMS.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados no presente trabalho, permitiram a execução dos objetivos propostos na área de estudo:

Figura 14 – Fluxograma metodológico do trabalho.



Fonte: Próprio autor (2017).

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada sobre a bacia hidrográfica Caveiras Montante 1, inserida na bacia do rio Caveiras, localizada na região serrana do estado de Santa Catarina, Brasil. A bacia hidrográfica do rio Caveiras possui área de 2413,27 km², sendo a segunda maior sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Canoas, ambas estabelecidas na região hidrográfica do rio Uruguai.

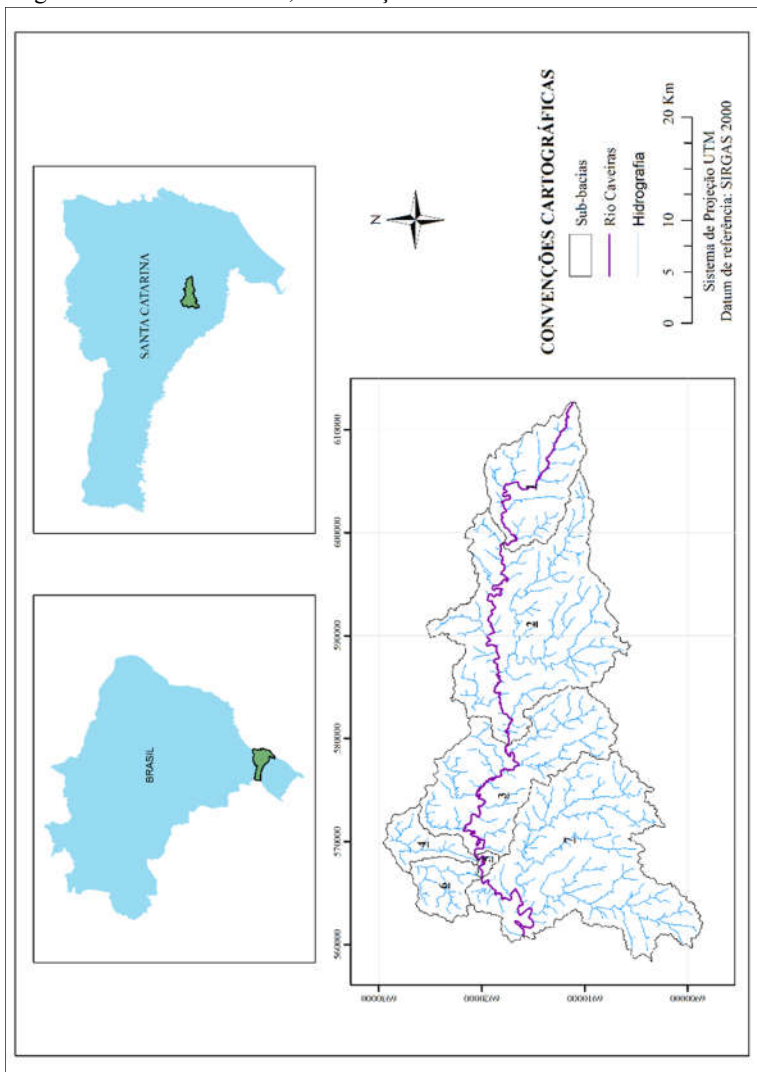
A bacia hidrográfica, ou neste caso, sistema Caveiras Montante 1 possui área total de 798,45 km², e suas respectivas sub-bacias selecionadas para realização deste estudo, encontram-se dispostas com suas áreas na Tabela 5 e Figura 15.

Tabela 5 – Identificação do esquema conceitual de sub-bacias do sistema Caveiras Montante 1.

Ordenamento montante para jusante	Sub-bacias delimitadas	Áreas (km²)
1	Caveiras Montante 2	87,74
2	UDESC Paineel	251,55
3	Caveiras Lages	152,73
4	Ponte Grande	27,15
5	Entre Rios	3,58
6	Carahá	30,16
7	Ponte Velha	245,54

Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 15 – Área de estudo, localização do sistema Caveiras Montante 1.



Fonte: Próprio autor (2017).

O esquema com as divisões de sub-bacias estabelecido na Tabela 5 foi determinado com base na instalação de novas estações fluviométricas em locais essenciais para o monitoramento hidrométrico do rio Caveiras. Os pontos escolhidos podem estabelecer características específicas pertencentes a cada uma das áreas de captação identificadas na bacia Caveiras Montante 1, principalmente no que diz respeito ao uso e ocupação do solo e relevo.

O exutório final da bacia Caveiras Montante 1 localiza-se na antiga estação fluviométrica Ponte Velha, sob responsabilidade da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina), o que dá nome à sub-bacia mais a jusante do sistema. Entretanto, a bacia hidrográfica considerada neste trabalho recebeu nomenclatura diferente, visto que, atualmente, a estação é denominada Caveiras Montante 1, ao integrar parte da rede de monitoramento hidrométrica do rio Caveiras.

As sub-bacias Caveiras Montante 2 e UDESC Painel se referem à instalação de nova estação fluviométrica sob responsabilidade da CELESC e novo sensor de nível automático implantado pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) na divisa do município de Painel com Lages, respectivamente em seus exutórios. Quanto a sub-bacia Caveiras Lages refere-se ao ponto de entrada do rio Caveiras próximo do centro urbano. As sub-bacias Ponte Grande e Carahá representam o nome de seus respectivos cursos d'água afluentes do rio Caveiras, assim como Entre Rios (rio Caveiras) estabelece sub-bacia intermediária entre as duas anteriores. E por último, a sub-bacia Ponte Velha citada anteriormente.

3.1.1 Suporte de SIG – HEC-HMS

No desenvolvimento deste trabalho, para todas as atividades relacionadas a dados geoespaciais dentro da modelagem hidrológica foi utilizado o HEC-GeoHMS (*Hydrologic Engineering Center's Geospatial Hydrologic Modeling*). As sub-bacias foram delimitadas com o uso do HEC-GeoHMS, fixando os exutórios das sub-bacias de acordo com os locais e respectivos motivos definidos previamente.

Os dados espaciais, definidos como dados que descrevem as características geográficas da superfície, tanto de órgãos oficiais como produzidos pelo próprio autor, são essenciais para o desenvolvimento deste estudo. Tal suporte, junto ao HEC-GeoHMS, pode integrar o gerenciamento de dados com a interface gráfica para o usuário realizar o pré-processamento de dados hidrológicos. Deste modo, o mesmo pode analisar informações do Modelo Digital de Terreno (MDT), delimitar as

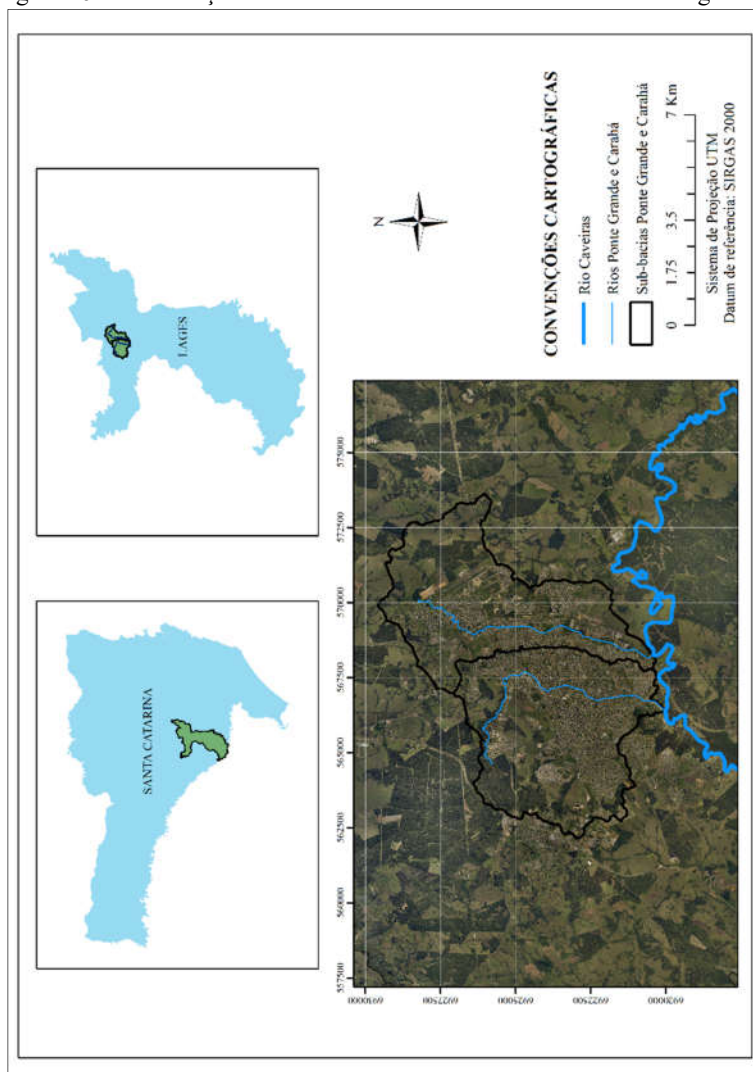
sub-bacias e a hidrografia que se deseja estudar, além de preparar a entrada de diversos parâmetros para o modelo hidrológico HEC-HMS.

A geometria espacial se trata da base física das sub-bacias e respectivos cursos d'água de estudo para a modelagem hidrológica, realizando sua extração com auxílio do HEC-GeoHMS e delineando a hidrografia, como ilustrado na Figura 15. Por meio desta extração, foi possível determinar dados relativos ao canal principal, sua subdivisão por trechos, comprimentos e declividades dos trechos, seções transversais, entre outras informações de base física. A construção da geometria espacial foi realizada a fim de caracterizar os afluentes relevantes como os rios Ponte Grande e Carahá que chegam ao rio Caveiras no município de Lages, Santa Catarina.

O foco dentro da área de estudo foi estabelecido buscando-se estudar as vazões extremas que ocorreram na região urbana da cidade de Lages/SC, município onde vive uma população de cerca de 160.000 habitantes, possui a maior área dentro da bacia do rio Caveiras e trata-se do principal polo econômico do planalto sul de Santa Catarina. Vale ainda ressaltar que a cidade também se abastece e despeja seus efluentes nas águas do rio Caveiras. Geograficamente, encontra-se na posição média de 27°49' de latitude sul e 50°20' de longitude oeste. Sua altitude média é de 940 m e seu núcleo urbano principal espalha-se por uma área aproximada de 88 km² (CORDEIRO; RAFAELI NETO, 2015).

No município, os principais rios que cortam a cidade, rio Carahá e Ponte Grande, cruzam uma grande extensão da área urbana (Figura 16), e, portanto, a hidrografia que constitui as principais sub-bacias urbanas são formadas pelo rio Caveiras e seus afluentes Carahá e Ponte Grande, com suas respectivas áreas de captação de 30,16 e 27,15 km², respectivamente.

Figura 16 – Localização dos afluentes urbanos do rio Caveiras em Lages/SC.



Fonte: Próprio Autor (2017).

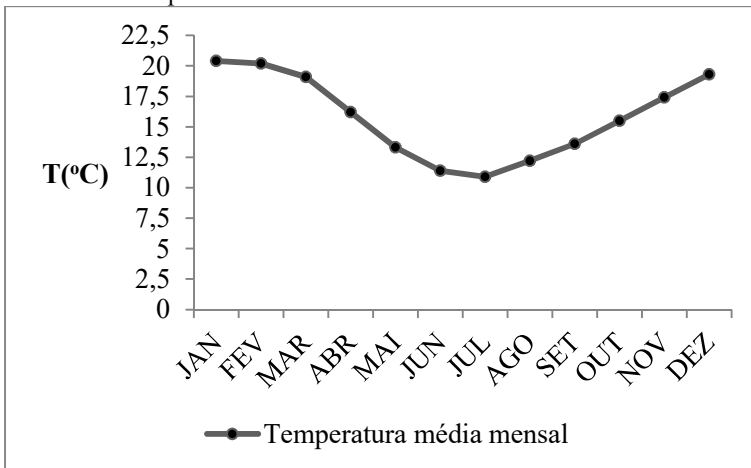
3.1.2 Clima

O clima da região é caracterizado por apresentar um inverno bastante frio, marcado pela ocorrência de fortes geadas e, em alguns anos, queda de neve. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo "Cfb", mesotérmico, subtropical úmido, com verões frescos, não apresentando estação seca definida. As geadas são freqüentes, em média mais de quinze dias por ano (MOTA; BEIRSDORF; GARCEZ, 1971).

Sob responsabilidade do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e monitorada pela EPAGRI-CIRAM (Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina), a estação meteorológica de Lages/SC (código 2750031) encontra-se localizada nas coordenadas 27°48'55" de latitude Sul e 50°19'46" de longitude Oeste a 937m de altitude.

A temperatura média anual para a região de estudo encontra-se em torno de 15,8°C, os meses que compreendem o trimestre de dezembro a fevereiro apresentam as máximas, enquanto as mínimas encontram-se de junho a agosto, considerando a série histórica de médias mensais disponíveis de 1941 a 2014 (Figura 17). Em termos absolutos, a temperatura máxima de 35,3°C foi registrada para um mês de janeiro e a temperatura mínima de -7,4°C, registrada para um mês de julho.

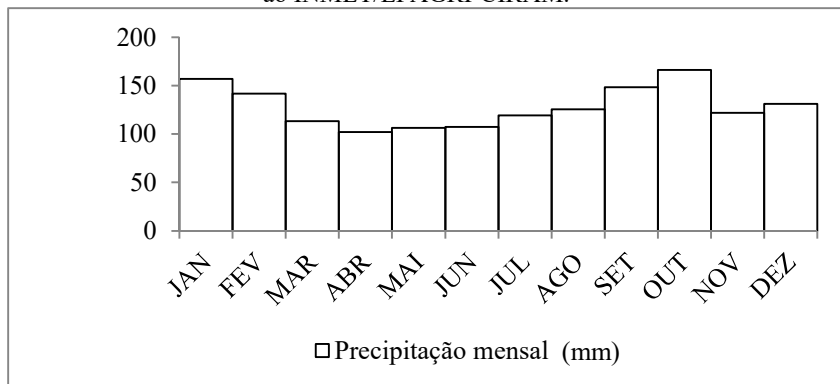
Figura 17 – Dados de temperatura média mensal (1941-2014) da estação Lages pertencente ao INMET/EPAGRI-CIRAM.



Fonte: Próprio Autor (2017)

Com base na mesma estação meteorológica, o regime pluviométrico apresenta, em média, 128,4 mm mensais. Para todos os meses do ano o regime apresenta-se acima dos 100 mm, as precipitações médias mensais máximas são encontradas nos meses de setembro, outubro e janeiro, e mínimas no período de abril, maio e junho (Figura 18). A precipitação média anual é de 1.540,3 mm.

Figura 18 – Dados de precipitação média mensal da estação Lages pertencente ao INMET/EPAGRI-CIRAM.



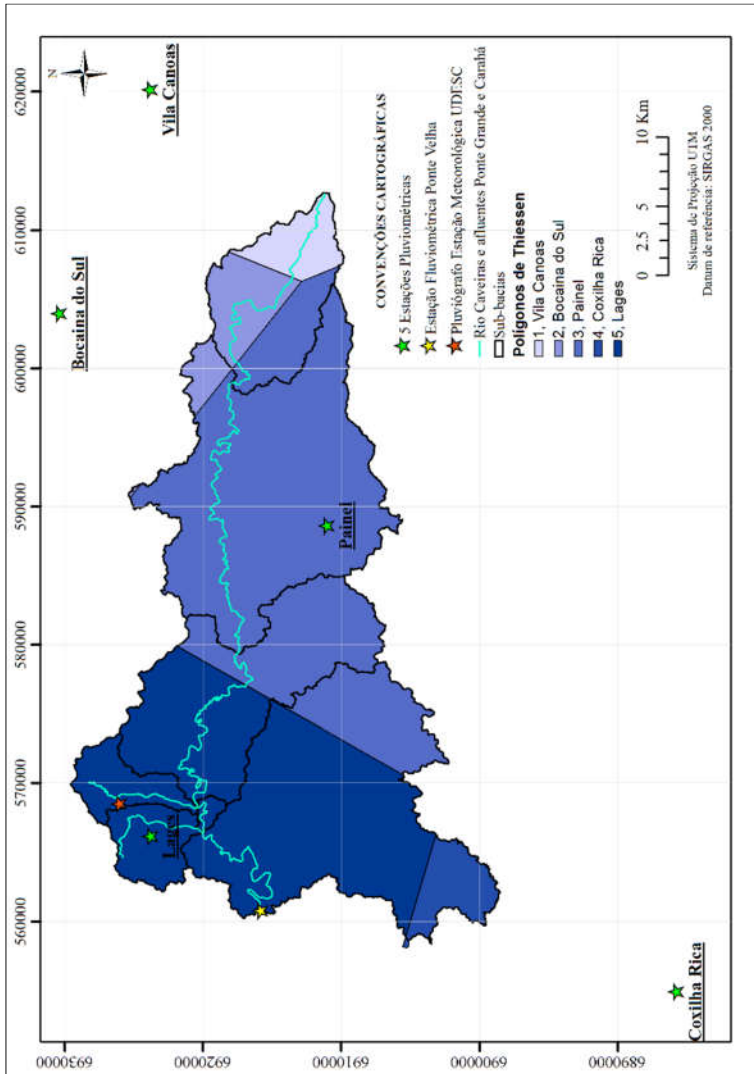
Fonte: Próprio Autor (2017)

A estação pluviométrica Ponte Velha trata-se da única estação com disponibilidade de dados observados de vazão para as datas dos eventos selecionados na área de estudo. Com o código 71620500 no sistema *hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA), encontra-se localizada nas coordenadas 27°52'49,40'' de latitude Sul e 50°22'56,94'' de longitude Oeste a 857,95m de altitude.

Quanto às estações pluviométricas utilizadas para caracterização da precipitação na bacia hidrográfica Caveiras Montante 1, foram selecionadas cinco estações que possuem séries históricas para um processo de análise e consistência confiável. Conforme a Figura 19, são elas: Bocaina do Sul (02749035), Lages (02750005), Coxilha Rica (02850004), Paineis (02750007) e Vila Canoas (02749031).

As precipitações acumuladas tiveram seus valores estabelecidos pelo método de polígonos de Thiessen (Figura 19), pois é um método de interpolação implícito no modelo. Além destas, foram utilizados os dados de um pluviógrafo instalado no campus da UDESC, em Lages, para aquisição de informações de duração, com intervalo de 10 minutos.

Figura 19 – Localização das estações pluviométricas e fluviométrica e polígonos de Thiessen no sistema Caveiras Montante 1.



Fonte: Próprio Autor (2017).

3.1.3 Caracterização e uso do solo

Os solos predominantes da bacia Caveiras Montante 1 são cambissolos, neossolos e nitossolos (Figura 20). Os dois primeiros predominam próximos aos talvegues, enquanto os nitossolos, típicos das encostas, são solos rasos, com horizonte A assentado diretamente sobre a matriz. Esse solo é hidromórfico, ou seja, característico de áreas alagadas ou sujeitas a alagamento (CORDEIRO; RAFAELI NETO, 2015). Portanto, os solos próximos da região urbana encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água, salvo quando artificialmente drenados. A água permanece estagnada internamente, ou a saturação é por fluxo lateral no solo. Em qualquer circunstância, a água do solo pode se elevar por ascensão capilar, atingindo a superfície. Esses solos são mal ou muito mal drenados, em condições naturais (EMBRAPA, 2004).

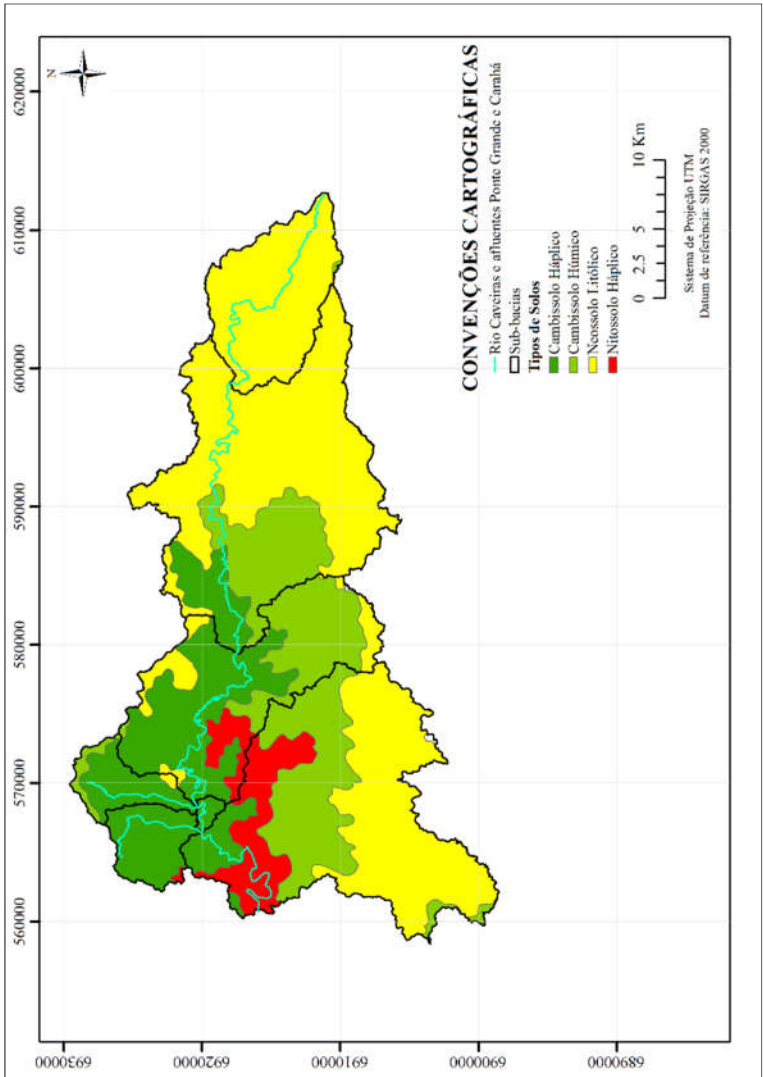
As sub-bacias, conforme identificadas na tabela 5, apresentam um uso e ocupação do solo diferente para cada uma delas. As classes foram identificadas no mapeamento com imagens LANDSAT TM 5 de outubro de 2004, em vista dos eventos a serem detalhados mais à frente, nos anos de 2005, 2008 e 2011, e também pela melhor qualidade das imagens encontradas.

A sub-bacia Caveiras Montante 2 apresenta a maior área coberta por floresta nativa, em torno de 75%, e tem como destaque o fato de não existir núcleo urbano. A jusante desta área, na sub-bacia UDESC Painel, a floresta nativa diminui gradativamente atingindo em torno de 48% da área de captação, sendo igualmente representada pela classe campo, e ainda com 2% de reflorestamento e 2% dividido por todas as outras classes. Quanto à sub-bacia Caveiras Lages obteve-se em torno de 52% da área como campo e, a floresta nativa diminui ainda mais, para 32%. O reflorestamento e agricultura atingem em torno de 9% e 5%, respectivamente.

Em relação às sub-bacias urbanas, na área de captação referente ao rio Ponte Grande, verifica-se 44% representado por núcleo urbano e 42% por campo. Na área intermediária Entre Rios, observa-se 56% da área representada por campo e a presença de floresta nativa e reflorestamento, com 21% e 16% respectivamente. No Carahá, observa-se a maior área de núcleo urbano, com aproximadamente 61%, indicando a sub-bacia com maior impermeabilidade.

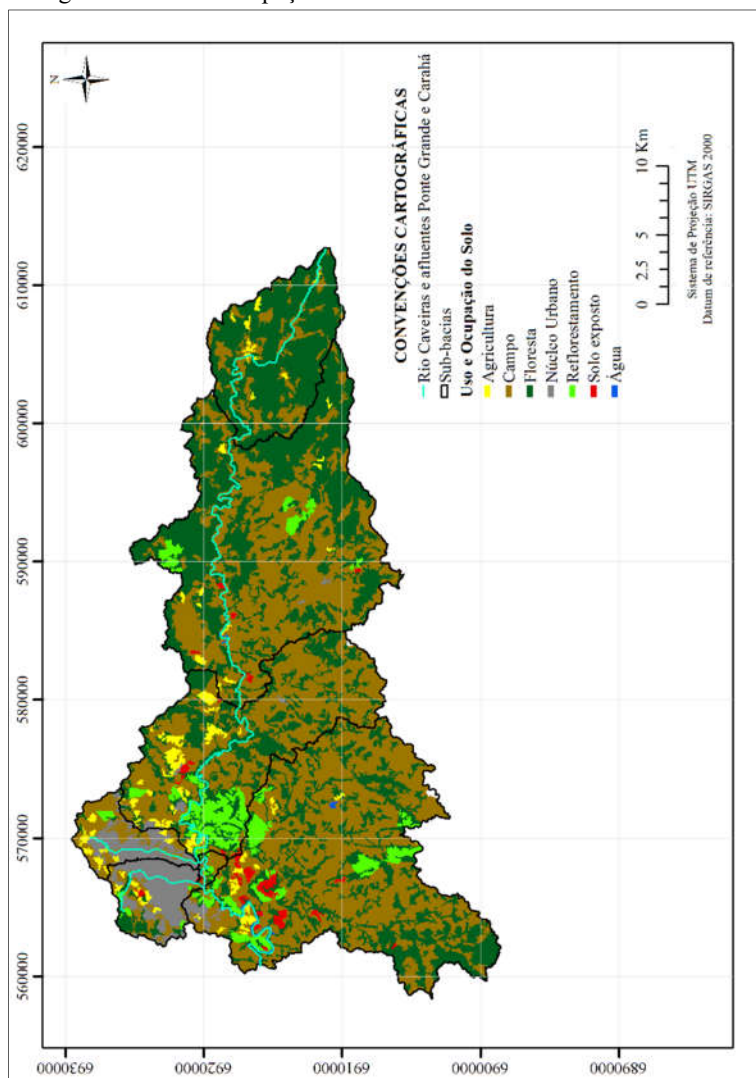
Por último, a sub-bacia Ponte Velha apresenta 60% de sua área de captação com a classe campo, 30% de floresta nativa e de 2% para o solo exposto.

Figura 20 – Tipos de solos no sistema Caveiras Montante 1.



Fonte: EMBRAPA (2004).

Figura 21 – Uso e ocupação do solo no sistema Caveiras Montante 1.



Fonte: Próprio Autor (2017).

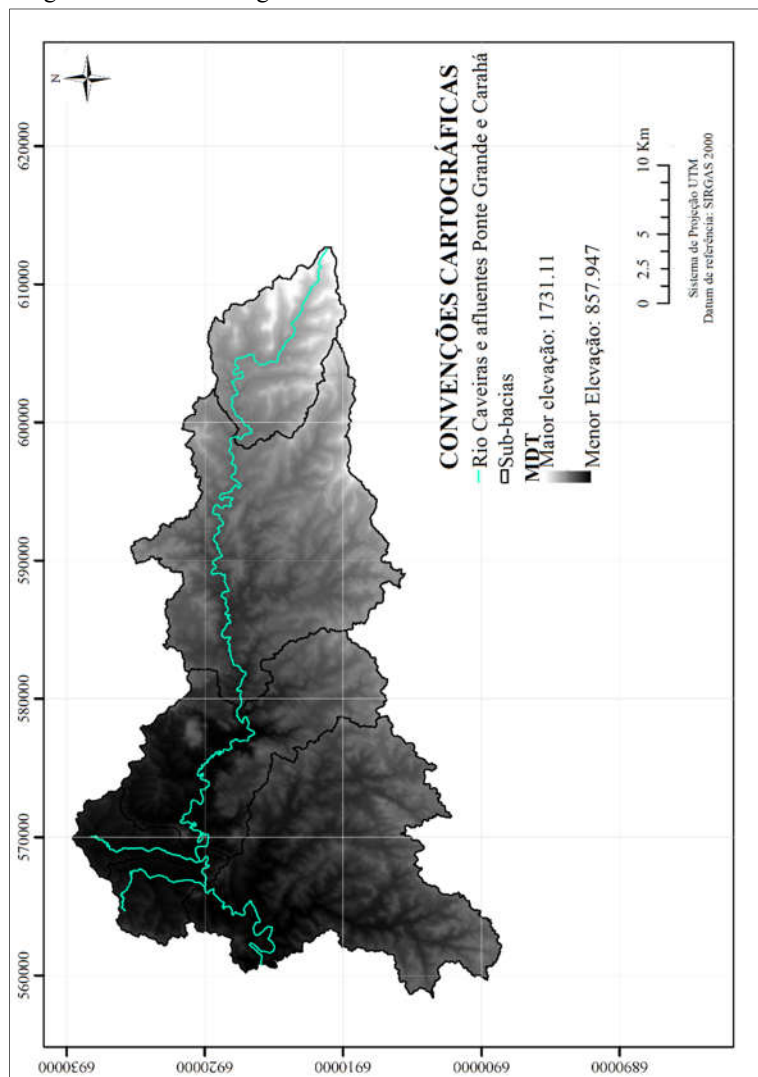
3.1.4 Altimetria

Por meio do levantamento aerofotogramétrico da Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDS), as fotografias aéreas digitais ou ortofotos de cor natural e infravermelha com resolução de 39 cm (SDS, 2013), puderam ser utilizadas para extrair informações de altimetria bem detalhadas para este trabalho.

O modelo digital de terreno (MDT) é um dos dados de entrada fundamentais para a modelagem hidrológica. O MDT utilizado possui resolução espacial de 1 metro (SDS, 2013), e, antes de iniciar o devido processamento foi reamostrado para a resolução espacial de 5 metros (Figura 22), buscando realizar a delimitação das sub-bacias com o HEC-GeoHMS.

Por fim, no MDT (Figura 22) a coloração mais escura indica locais baixos, próximos aos talwegues, enquanto que a mais clara representa os cumes e pontos mais elevados nas sub-bacias. Além disso, é possível observar a predominância de grandes montanhas na área de montante às sub-bacias urbanas e o início das planícies naturais de inundação já na sub-bacia Caveiras Lages e que se estende até o exutório na estação Ponte Velha.

Figura 22 – Modelo Digital de Terreno do sistema Caveiras Montante 1.



Fonte: Próprio autor (2017).

3.1.5 Eventos selecionados

As bacias essencialmente urbanas do sistema Caveiras Montante 1 (Ponte Grande e Carahá), com trechos do canal principal e seus afluentes, dentro dos limites da cidade de Lages, são aquelas que sofrem com inundações. Além de suas drenagens naturais, ao longo destes canais existem pequenas e grandes ligações de condutos de concreto e PVC, assim como sarjetas e galerias contribuintes de bairros inteiros da cidade que contribuem constantemente para a vazão dos canais.

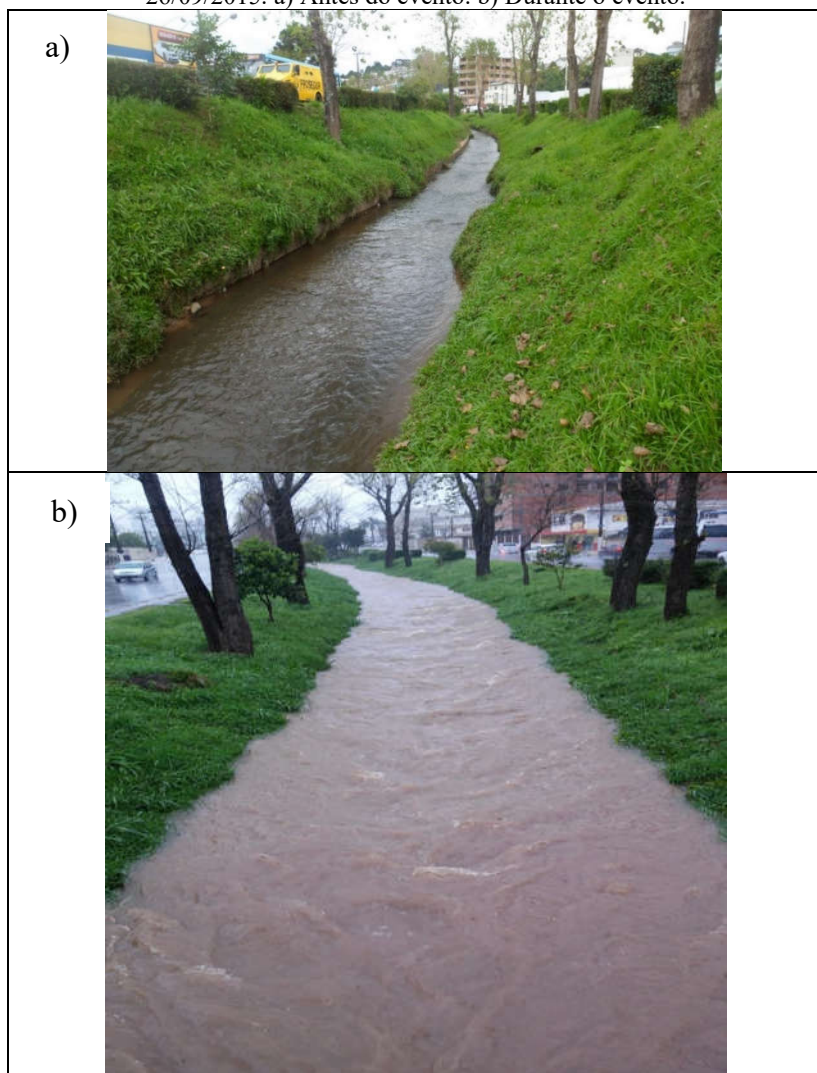
A fim de exemplificar e ilustrar as vazões extremas que ocorrem durante os eventos, a Figura 23 demonstra a resposta da sub-bacia do rio Carahá durante um evento ocorrido em 26/09/2015. Na Figura 24, em ambos os rios Ponte Grande e Carahá, podem ser visualizadas as imagens proporcionadas pelos sobrevoos durante o evento de 2011, um dos selecionados para este trabalho, demonstrando a dimensão do evento. Nos Apêndices A a D, apresentam os registros fotográficos de um reconhecimento do rio Caveiras durante um dia sem registros antecedentes de precipitação e em outro dia com registros prévios de precipitação. Isso demonstrou a diferença brusca da cota do rio Caveiras em relação aos galhos das árvores, ou seja, o efeito que um evento extremo de precipitação causa na vazão das sub-bacias.

Em seguida, antes de descrever os eventos selecionados para estudo das vazões de pico e volumes de cheia, deve-se destacar o esforço que surge de um acordo realizado pela Defesa Civil de Lages, delimitando a campo durante os eventos as áreas de inundação, e a Secretaria Municipal de Planejamento (SEPLAN), vetorizando as áreas inundadas para a análise espacial.

De acordo com a disponibilidade e confiabilidade dos dados pluviométricos e fluviométricos de eventos que provocaram desastres por inundação em 2005, 2008 e 2011, optou-se pela modelagem orientada por eventos. A escolha foi baseada no fato de permitir relacionar os resultados encontrados com os mapas de inundação existentes e também estudar o comportamento hidrológico das sub-bacias delineadas para cada um dos eventos. As datas de eventos selecionados para o estudo são 18 e 19/05/2005, 15 e 16/02/2008, e 08 e 09/08/2011 (Tabela 6).

Nas figuras 25, 26 e 27 são visualizadas as “manchas” de inundação dos eventos selecionados para este trabalho, de acordo com seus respectivos volumes acumulados e distribuição espacial das chuvas nas sub-bacias. No Apêndice E encontra-se a série histórica completa referente ao período de funcionamento da estação Ponte Velha.

Figura 23 – Resposta imediata na vazão do rio Carahá no evento do dia 26/09/2015. a) Antes do evento. b) Durante o evento.



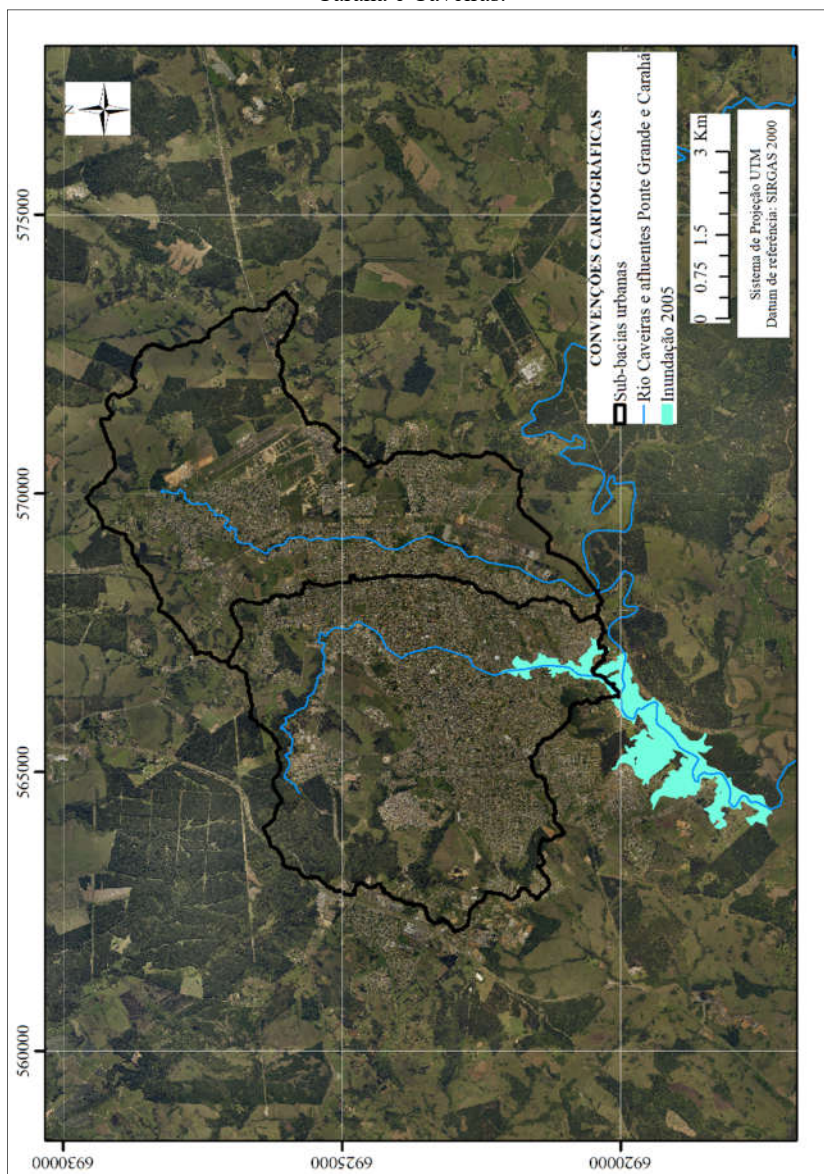
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 24 – Fotografias do sobrevoo realizado no evento de 2011. a) Inundações e consequentes alagamentos no rio Ponte Grande. b) Inundações no rio Carahá.



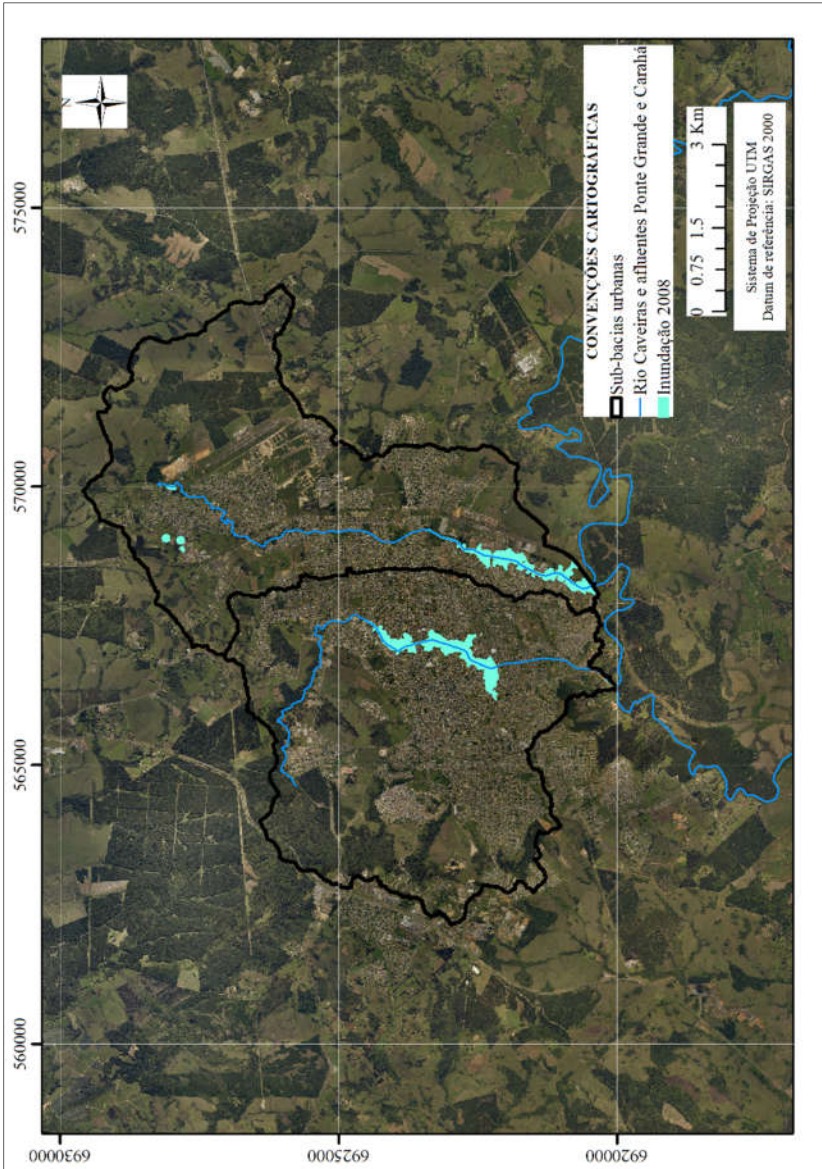
Fonte: Polícia Militar de Santa Catarina (2011).

Figura 25 – Principais áreas de inundação para o evento de 2005 nos rios Carahá e Caveiras.



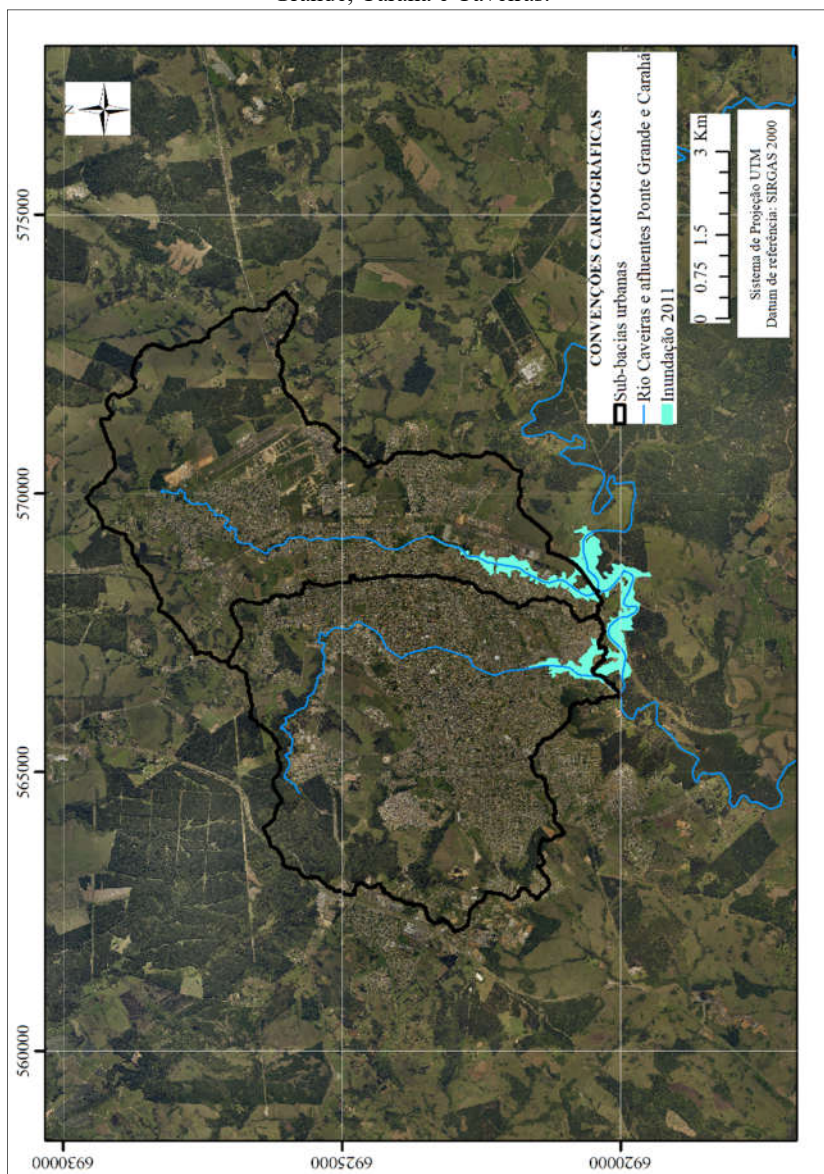
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 26 – Principais áreas de inundação para o evento de 2008 nos rios Ponte Grande e Carahá.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 27 – Principais áreas de inundação para o evento de 2011 nos rios Ponte Grande, Carahá e Caveiras.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Desta forma, diante de tais informações e dos mapas dos desastres por inundação ocorridos nos anos de 2005, 2008 e 2011 nenhum estudo hidrológico foi realizado até o momento para auxiliar o entendimento dos mecanismos geradores das inundações. Assim sendo, a análise específica destes eventos pôde ser desenvolvida ao consultar as séries históricas disponíveis.

Os dados observados tanto de vazão como de precipitação são diários, ou seja, trata-se da chuva acumulada diária ponderada pelas 5 estações pluviométricas disponíveis. E também, de vazão média diária mensurada por meio de curva-chave específica pertencente à estação fluviométrica Ponte Velha que monitorou o nível do rio Caveiras de 2002 a 2011 e desde 2012 vem monitorando com a nomenclatura de Caveiras Montante 1.

Pensando no fato de que a duração dos hidrogramas simulados a jusante deve ser suficientemente longa para que o volume total representado seja, no mínimo, igual ao volume do hidrograma observado a montante, foram adotados diferentes períodos para cada evento. No total, contando o número de dias antes e após o evento, para 2005, 2008 e 2011 foram necessários 30, 17 e 16 dias, respectivamente.

Tabela 6 – Períodos escolhidos para a modelagem hidrológica.

Duração do evento responsável pela vazão de pico	Período utilizado para a modelagem hidrológica
18 e 19/05/2005	13/05 a 11/06/2005
15 e 16/02/2008	11/02 a 27/02/2008
08 e 09/08/2011	04 a 19/08/2011

Fonte: Próprio Autor (2017).

Visando um embasamento melhor da caracterização de cada um dos eventos, a Tabela 7 apresenta informações constantes nos relatórios de Avaliações de Danos – AVADAN (Anexos A, B e C), criados pelo Sistema Nacional de Defesa Civil – SINDEC, e preenchidos pela Defesa Civil municipal.

Tabela 7 – Descrição dos eventos selecionados.

Evento	Descrição	Classificação
2005	Enchentes com alagamentos e inundações devido às fortes chuvas ocorridas, o que ocasionou um grande volume de água despejado nos rios que contornam Lages/SC.	Enchentes ou Inundações graduais
2008	Chuva intensa e concentrada que causou o transbordamento do rio Carahá. Desastre súbito e de evolução aguda.	Enxurrada ou Inundação brusca
2011	Ocorrência de vendaval unido a fortes chuvas, ocasionando alagamento, enxurrada e enchente em parte da cidade.	Tempestade convectiva

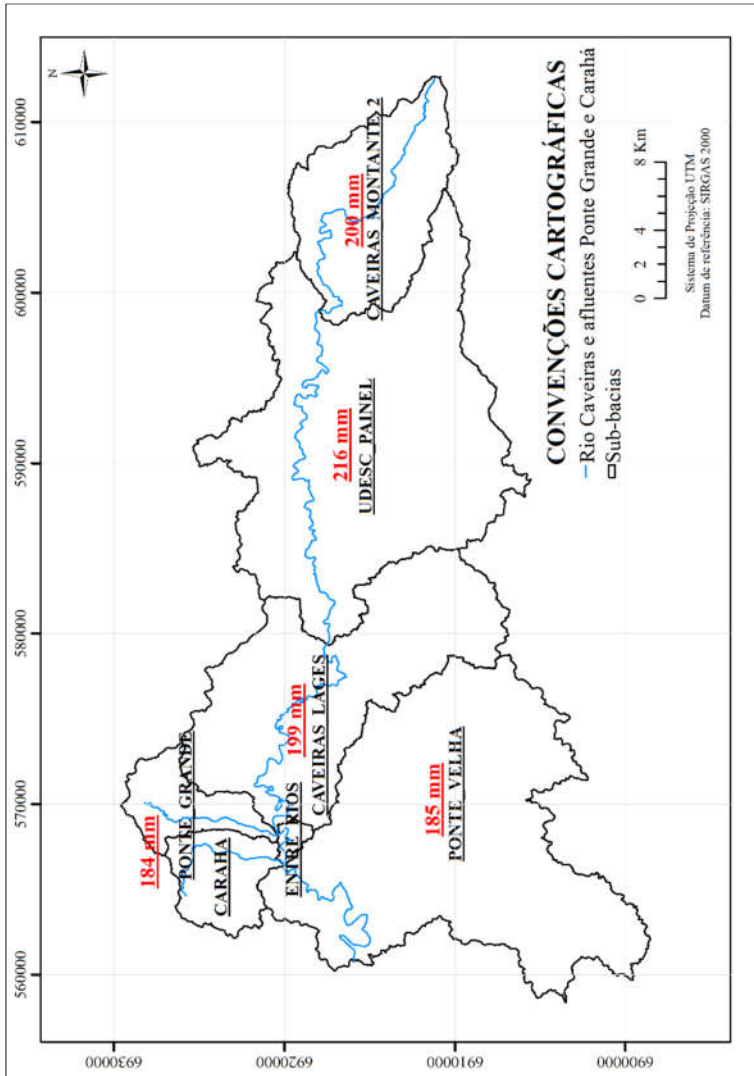
Fonte: S2ID (2016).

Com relação à vazão observada nos eventos selecionados das séries históricas da estação fluviométrica Ponte Velha, a qual caracteriza-se como a resposta do sistema Caveiras Montante 1, foi realizada uma análise de consistência das vazões. Deste modo, é possível utilizar os dados da estação fluviométrica Ponte Velha para que na modelagem hidrológica ocorra a estimativa da vazão para as sub-bacias urbanas de interesse que não possuem monitoramento.

Na caracterização dos dados observados de precipitação para os eventos selecionados, os volumes acumulados de chuva responsáveis pelas vazões de pico, foram ponderados para cada uma das sub-bacias do sistema Caveiras Montante 1.

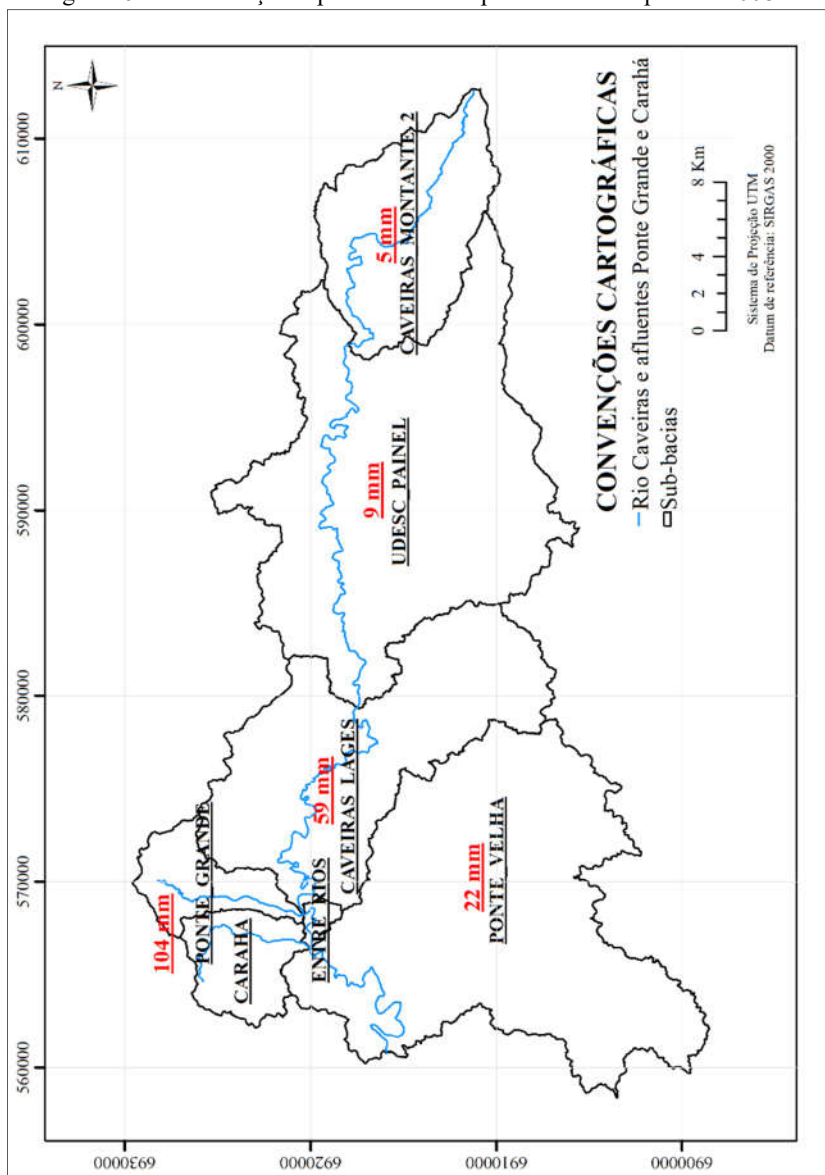
Desta forma, é possível caracterizar os eventos ao analisar dois fatores: a distribuição espacial da chuva em relação às sub-bacias consideradas e à severidade de cada um dos eventos. O primeiro fator pode ser visualizado nas figuras 28, 29 e 30. Para as precipitações acumuladas nas sub-bacias urbanas (Ponte Grande, Entre Rios e Carahá) é considerado o mesmo volume de chuva para cada, pois, encontram-se dentro do mesmo polígono, ponderado apenas com dados provenientes da estação pluviométrica Lages.

Figura 28 – Distribuição espacial da chuva para a vazão de pico de 2005.



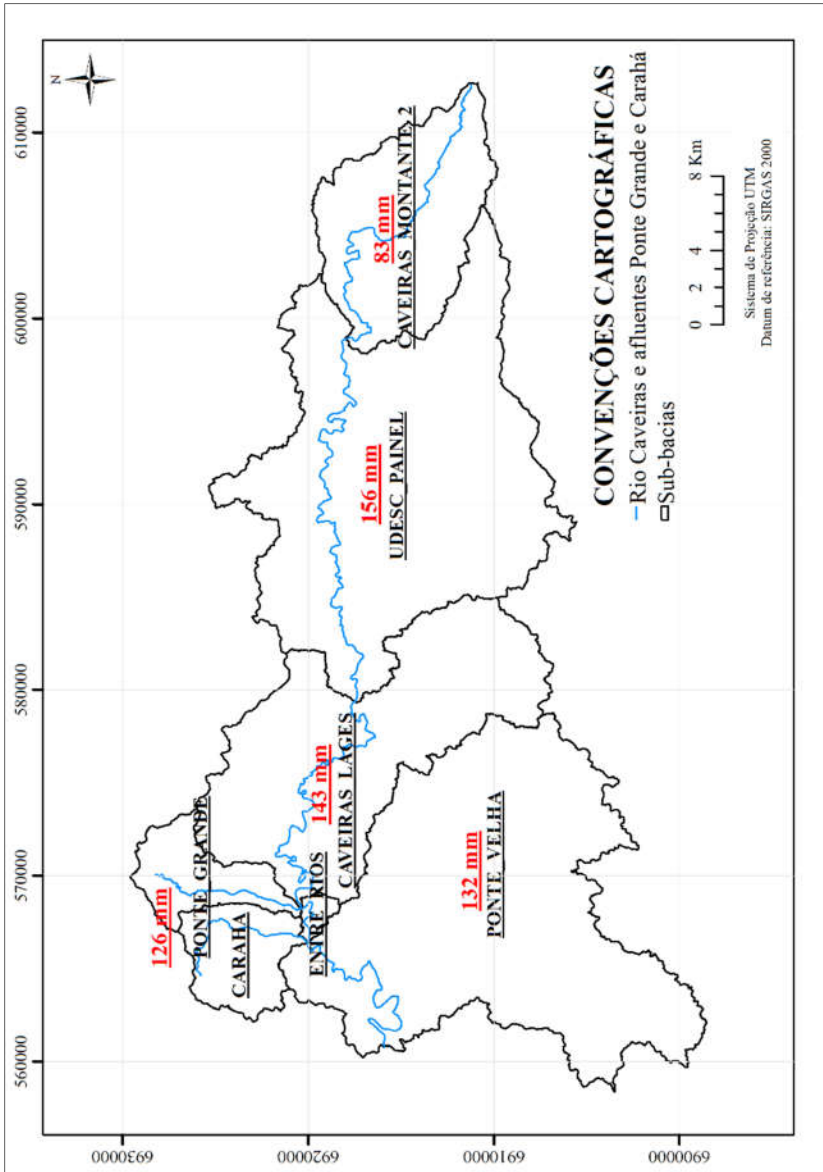
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 29 – Distribuição espacial da chuva para a vazão de pico de 2008.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 30 – Distribuição espacial da chuva para a vazão de pico de 2011.



Fonte: Próprio Autor (2017).

O segundo fator considerado, a severidade de cada evento, é definido por meio do tempo de retorno. Tal característica pôde ser estimada devido aos registros do pluviógrafo instalado no campus da UDESC, que pode captar eventos com tempo de duração menor que 24 horas, uma limitação para as outras estações pluviométricas com dados de acumulados diários. Portanto, além das informações constantes nos relatórios de Avaliações de Danos (Anexos A a C) que indicam os prejuízos econômicos e sociais para o município de Lages, também se encontram registradas as durações dos eventos nos pluviogramas dos Anexos D a F. A determinação do tempo de retorno dos eventos selecionados ocorre de acordo com dois métodos, ambos se baseando na duração do evento registrada pelos pluviogramas.

O primeiro método utiliza a curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência), a qual consiste na adoção de curvas padronizadas, construídas a partir de registros históricos, que apresentam um valor de intensidade de chuva em relação a sua duração total e o seu tempo de retorno (CANHOLI, 2005). A curva IDF para a cidade de Lages, conforme equação 16, atualizada e publicada por Cardoso *et al.* (2014) com base em 10 anos de observação, de 2000 a 2009:

$$i = 2050Tr^{0.20}(t + 30)^{-0.89} \quad (16)$$

onde i é a intensidade média da chuva (mm/h), Tr é o tempo de retorno (anos), e t é a duração da chuva (minutos). Cardoso *et al.* (2014), foi considerada uma duração de chuva para eventos de até 18 horas, sendo compatível com o evento de 2008 (Tabela 7), e tempos de retorno de 2 a 100 anos.

No segundo método, para os eventos de 2005 e 2011 com durações superiores a 24 horas (Tabela 7), foi realizada a análise estatística de probabilidade de chuvas intensas e de tempo de retorno denominada distribuição de Gumbel. Em cada observação, com base em 29 anos de observação disponível, de 1987 a 2015, na estação pluviométrica Lages, foi coletada a chuva máxima de 48 horas para cada ano da série.

O procedimento sistemático foi organizar a série máxima anual em ordem decrescente. Em seguida, foram calculadas as estatísticas amostrais de média aritmética e desvio-padrão, a fim de gerar a variável reduzida de Gumbel. Logo, a probabilidade teórica esperada de um valor extremo ser atingido ou superado foi obtida por:

$$P_i = 1 - e^{-e^{-y_i}} \quad (17)$$

onde P_i é a probabilidade teórica esperada, e é a base do logaritmo neperiano e y_i é a variável reduzida de Gumbel.

O tempo de retorno (Tr_i), definido como a recíproca da probabilidade, ou seja, o intervalo médio, em anos, em que um valor qualquer de chuva é igualado ou superado, pelo menos uma vez, é calculado por:

$$Tr_i = \frac{1}{P_i} \quad (18)$$

Deste modo, foi possível captar os eventos de longa duração para atribuir um tempo de retorno para as chuvas máximas da série, inclusive os anos de 2005 e 2011. O uso de ambos os métodos pôde normalizar a severidade dos eventos selecionados considerando a duração correta de cada evento, isto é, permitiu que ambos pudessem ser comparados para análise.

Pode-se visualizar a Tabela 8 sintetizando as figuras 28, 29 e 30, e apresentando as características de cada evento, atribuindo assim, uma severidade para cada um deles, por meio do tempo de retorno calculado.

Tabela 8 – Dados dos eventos extremos escolhidos para o estudo.

Data do evento / Chuva acumulada	Distribuição espacial	Duração (horas)	Intensidade média (mm/h)	Tempo de Retorno (anos)
18 e 19/05/2005 (184 mm)	Disseminada	32	5,74	384
15 e 16/02/2008 (104 mm)	Concentrada	4,5	23,11	29
08 e 09/08/2011 (124 mm)	Disseminada	35	3,53	22

Fonte: Próprio Autor (2017).

3.2 APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Seguindo o fluxograma metodológico do trabalho (Figura 14), foram utilizados os métodos embasados previamente, e para suas aplicações foram estimados os parâmetros relacionados aos métodos de cálculo escolhidos para iniciar o processo de calibração do sistema Caveiras Montante 1. Assim, busca-se gerar os hidrogramas para determinação da resposta das sub-bacias durante os eventos selecionados.

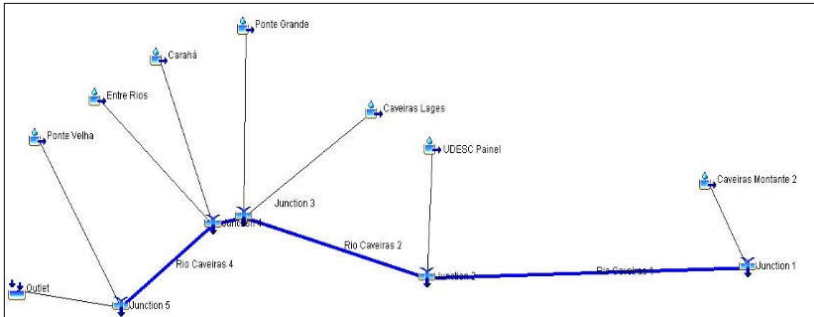
Deste modo, fica dependente da correta estimativa dos parâmetros a confiabilidade nos resultados obtidos, visto que os métodos de cálculo dos processos hidrológicos estão diretamente relacionados às características intrínsecas das sub-bacias e canais envolvidos nos parâmetros. Estimativas de valores iniciais para os parâmetros, além da utilização das metodologias específicas, também foram obtidos a partir de informações encontradas na literatura.

3.2.1 Criação do esquema conceitual

A estrutura ou esquema conceitual do HEC-HMS para representação dos processos hidrológicos no sistema Caveiras Montante 1 tem sua delimitação na Figura 31. Este esquema conceitual apresenta, por meio dos elementos hidrológicos conectados a propagação dos volumes até o exutório.

Quanto a identificação de cada item, as bacias são representadas por reservatórios com entrada de uma gota d'água e flecha de saída, os canais são representados por trechos em linhas azuis, a junção de tais volumes por meio de um reservatório com duas entradas e uma saída e o exutório um reservatório apenas com 2 entradas e sem saída. No Apêndice F pode ser encontrado o esquema conceitual arranjado na interface do HEC-HMS com as sub-bacias ao fundo.

Figura 31 – Esquema conceitual dos elementos hidrológicos na interface do HEC-HMS.



Fonte: Próprio Autor (2017).

3.2.2 Determinação do CN

Como descrito no capítulo 2, ao selecionar o método de cálculo de perda SCS-CN no modelo HEC-HMS, é requerida a inserção de valores para três parâmetros. Entretanto, na estimativa do valor inicial para calibração do método de perda nas sub-bacias de estudo, somente a definição de um único parâmetro de entrada foi necessária, o *Curve Number* (CN). O parâmetro de abstração inicial, que define os processos de detenção e retenção da água seja na superfície ou na interceptação pelas copas das árvores por exemplo, foi adotado o valor padrão do método, de 20% (equação 2). Com relação a impermeabilidade da sub-bacia, esta é representada pelo próprio parâmetro CN, visto que em sua determinação foi considerada a impermeabilidade das áreas urbanas do sistema Caveiras Montante 1.

O parâmetro CN depende do uso e ocupação do solo e de características hidrológicas da camada superior do solo. O tipo e condições de umidade antecedente foram determinados com base em metodologias consagradas (NRCS, 1986; CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988) e tabelas de referência por autores brasileiros (SARTORI; GENOVEZ; LOMBRADI NETO, 2005; TUCCI, 1998; COLLISCHONN; DORNELLES, 2013) para várias superfícies de solos agrícolas e urbanos, de acordo com seu grupo hidrológico de solo, tipo de vegetação e área impermeabilizada, e condições hidrológicas da superfície.

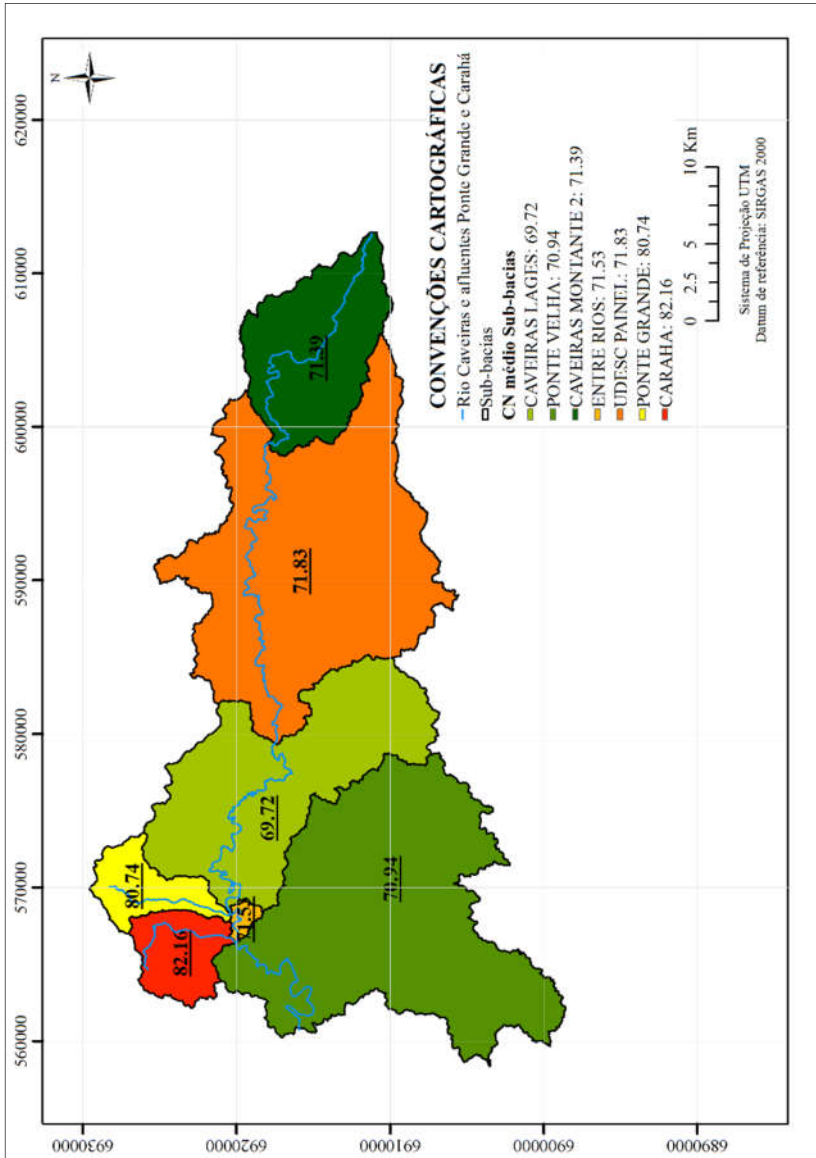
Para os quatro grupos hidrológicos de solos A, B, C e D (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013), classificados de acordo com a

capacidade de produção de escoamento superficial, o risco de ocorrência da geração de escoamento superficial aumenta no sentido de A para D, enquanto a capacidade de infiltração ocorre de modo inverso. De acordo com os tipos de solos encontrados (Figura 20) e as relações estabelecidas por Sartori, Genovez e Lombardi Neto (2005), os grupos hidrológicos adotados para nitossolo háplico, cambissolo háplico e húmico e neossolo litólico são B, C e D, respectivamente.

Deste modo, verifica-se a presença de solos pouco profundos e com muito baixa capacidade de infiltração nas sub-bacias de montante e extremidades do sistema Caveiras Montante 1, enquanto que solos menos permeáveis e com permeabilidade superior à média são encontrados conforme se direciona para as sub-bacias urbanas e o exutório do sistema.

Em seguida, os valores de CN foram ponderados em função do uso e ocupação estabelecido na Figura 21 em equivalência com o uso constante nas tabelas de referência (NRCS, 1986; TUCCI, 1998) e também com os grupos hidrológicos definidos anteriormente. Assim, no HEC-GeoHMS foi estimado o valor inicial médio do parâmetro (Figura 32) que será utilizado como base para calcular a parcela da chuva que efetivamente escoará superficialmente nas sub-bacias durante os eventos.

Figura 32 – CN médio ponderado por sub-bacias para o sistema Caveiras Montante 1.



Fonte: Próprio Autor (2017).

3.2.3 Determinação do tempo de retardo ou *Lag time*

A transformação da chuva efetiva em vazão pode ser obtida através de diversas técnicas de engenharia hidrológica. Uma técnica muito comum é a aplicação do conceito do SCS *Unit Hydrograph*, descrito no capítulo 2, o qual representa a resposta das sub-bacias para uma precipitação efetiva unitária, produzindo um hidrograma correspondente. O principal parâmetro de entrada para este método é o tempo de retardo de cada sub-bacia.

De acordo com a equação 7, o atraso da bacia é aproximado para 60% do tempo de concentração. Esse tempo caracteriza a forma do hidrograma unitário, sendo ainda definido pelo intervalo de tempo entre o início da precipitação e o instante em que todos os pontos da sub-bacia estão contribuindo para a vazão e, conseqüentemente, trata-se de um fator importante no comportamento hidrológico e na vazão de pico durante os eventos selecionados.

A avaliação do tempo de concentração das sub-bacias é bastante complexa, devido aos inúmeros condicionantes envolvidos, existindo uma grande variedade de expressões de cálculo, merecendo, por isso, grande atenção na sua determinação, pois influencia significativamente no hidrograma final.

Diferentemente da metodologia descrita na NRCS *Technical Release 55*, comumente conhecida como TR-55 (NRCS 1986) e bastante recomendada por estar integrada no HEC-geoHMS, o cálculo do tempo de concentração foi executado de acordo com a equação 6, já descrita anteriormente, recomendada por DNIT (2005) para o estudo de eventos extremos. Deste modo, foi obtida a tabela 9:

Tabela 9 – Tempos encontrados para as sub-bacias do sistema Caveiras Montante 1.

Sub-bacias	Tempo de concentração (horas)	Tempo de retardo (horas)	Tempo de retardo (minutos)
Caveiras Montante 2	7,36	4,42	264,95
UDESC Paineil	11,68	7,01	420,53
Caveiras Lages	11,92	7,15	429,23
Ponte Grande	6,44	3,86	231,87
Carahá	4,73	2,84	170,14
Entre Rios	1,97	1,18	70,85
Ponte Velha	13,24	7,94	476,60

Fonte: Próprio Autor (2017).

De uma forma geral, para uma mesma bacia hidrográfica a vazão de pico calculada é proporcional ao inverso do tempo de concentração para ela considerado. Portanto, isso significa que para as bacias urbanas de interesse, por exemplo, o rio Carahá pode possuir vazões de pico maiores que o Ponte Grande em seu exutório, levando em conta que possui um tempo de concentração menor, além da área superior.

Por fim, o conhecimento da distribuição temporal de intensidade da chuva, proporcionado pela transformação chuva-vazão, é importante, pois condiciona o volume da infiltração e a forma do hidrograma de escoamento superficial direto causado pela precipitação efetiva (BEMFICA; GOLDENFUM; SILVEIRA, 2000).

3.2.4 Determinação do escoamento subterrâneo

O método de Escoamento de Base utilizado foi o de recessão exponencial, e como apresentado no capítulo 2, tal método foi empregado com a estimativa inicial de três parâmetros. Vale destacar que esta escolha considera que após o evento, a diminuição da vazão do canal ou recessão ao longo do tempo é proporcional a um decaimento exponencial e tal método foi incluído devido ao interesse pela separação do escoamento de base para as sub-bacias sem monitoramento.

Por se tratar de modelagem orientada por evento, o balanço hídrico não é conhecido previamente, e é utilizada uma abordagem empírica para relacionar os parâmetros do modelo com as características de recessão de um hidrograma observado. Deste modo, presume-se que a

recessão do hidrograma é dominada pela resposta subterrânea no ponto em que cessa o escoamento direto superficial e subsuperficial. E então, identifica-se o ponto em que o escoamento direto cessa.

A separação do hidrograma em escoamento direto e subterrâneo é denominada separação do Escoamento de base. Os métodos de separação assumem uma resposta muito simples para a bacia hidrográfica, a qual é considerada uma soma de escoamento direto e do escoamento subterrâneo provindo de um suposto aquífero homogêneo, isto é, com uma única resposta característica, identificável a partir da recessão do hidrograma.

O primeiro parâmetro, de vazão inicial específica, representa a vazão inicial no canal em razão de sua área de captação. É afetada pela contribuição a longo prazo de água subterrânea, quando há ausência de chuva, e está sempre em função de condições antecedentes, como por exemplo, o tempo entre o evento selecionado e a última ocorrência de chuva. Portanto, o procedimento foi traçar a vazão inicial observada antes dos eventos de cheia em relação a área de captação da respectiva sub-bacia, baseando-se em diversas bacias monitoradas, plotando assim essa relação em gráficos do tipo *log* (USACE, 1994).

Quanto ao segundo, a constante de recessão, trata-se da relação entre qualquer vazão no ramo de recessão e a vazão seguinte, no caso, um dia depois, obtendo-se a taxa de inclinação da linha reta traçada a partir do parâmetro seguinte, a vazão limiar de recessão. Assim, é considerada uma característica de cada sub-bacia, sendo que depende da contribuição (Tabela 10) que está mantendo o curso d'água no passo de tempo anterior ao evento.

Tabela 10 – Valores típicos de k de acordo com a contribuição antecedente da sub-bacia.

Contribuição	Constante de recessão (k)
Subterrânea	0,95
Subsuperficial	0,8 a 0,9
Superficial	0,3 a 0,8

Fonte: Pilgrim e Cordery (1992).

No terceiro, a vazão limiar de recessão, com o decaimento exponencial esperado na vazão foi identificado o ponto em que a recessão começa (Figura 8). A técnica padrão (USACE, 1994) é traçar *log* no eixo da vazão ao longo do tempo e determinar o ponto em que a recessão se torna uma linha reta, plotados assim em um gráfico *semilog*. A vazão

limiar de recessão indica, portanto, a vazão do ramo de recessão do hidrograma calculado em que se inicia uma recessão exponencial.

Os valores iniciais estimados foram calculados com base em séries históricas referentes a outros eventos de 2005, 2008 e 2011, além dos selecionados para este estudo, buscando atrelar tais valores a períodos sem precedente de chuva, conforme Apêndice E.

Tabela 11 – Parâmetros do escoamento de base para as sub-bacias do sistema Caveiras Montante 1.

Sub-bacias	Vazão inicial específica (m ³ /s/km ²)	Constante de recessão	Valor limiar de recessão (m ³ /s)
Caveiras Montante 2	0,01226		9,91
UDESC Painel	0,01632		43,18
Caveiras Lages	0,01353		72,21
Ponte Grande	0,01043	0,9	2,83
Carahá	0,01033		3,12
Entre Rios	0,0079		82,83
Ponte Velha	0,01615		123,18

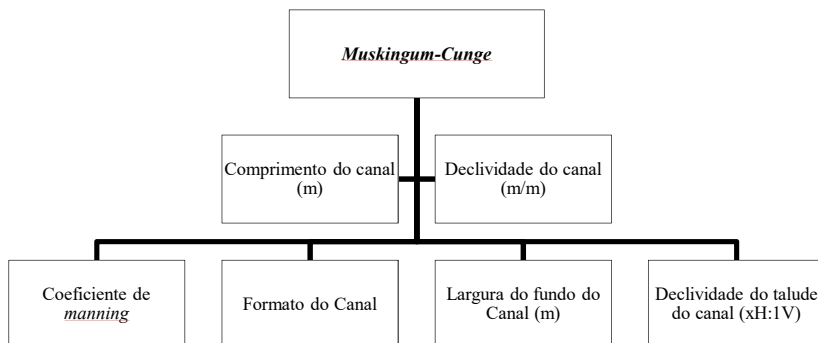
Fonte: Próprio Autor (2017).

3.2.5 Determinação das medidas físicas da calha dos canais

As equações matemáticas e os pressupostos em que se baseia o método de propagação de onda *Muskingum-Cunge* são explicados em detalhe no Capítulo 2. Para a aplicação deste método no HEC-HMS, os parâmetros de entrada (Figura 33) a serem definidos são aqueles relacionados à geometria da calha do canal e o coeficiente de *manning*, que define sua rugosidade.

Primeiramente, foi considerado uma simplificação para o formato trapezoidal do canal e a relação 1:1 para a declividade do talude. Em seguida, foi realizada, através do HEC-GeoHMS, a determinação do comprimento, declividade e largura atribuindo os valores separadamente para cada trecho de canal, com base no MDT e ortofotos provenientes do levantamento aerofotogramétrico de Santa Catarina (SDS, 2013).

Figura 33 – Parâmetros indicados no método de Propagação de onda *Muskingum-Cunge* no HEC-HMS.



Fonte: Próprio Autor (2017).

A geometria do canal foi verificada *in loco*, por meio de expedições a campo no rio Caveiras e seus afluentes urbanos Ponte Grande e Carahá. Além de fotografias e medições manuais (Figura 34 e 35), foram realizadas batimetrias com o uso do equipamento *Q-boat*, do laboratório de hidrologia do departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária no *campus* de Lages da UDESC. Tal equipamento, desenvolvido pela empresa americana *Teledyne RD Instruments* e pioneiro no Brasil, trata-se de um barco controlado remotamente que possui acoplado a si um sensor ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) e um ecobatímetro para medição tanto de vazão como realização da batimetria do curso d'água (Figura 36).

No Apêndice G constam os perfis batimétricos experimentais executados nas seções que podem caracterizar o comportamento hidrológico do sistema Caveiras Montante 1 durante os eventos selecionados.

Figura 34 – Confirmação *in loco* de parâmetros físicos relacionados ao rio Ponte Grande.



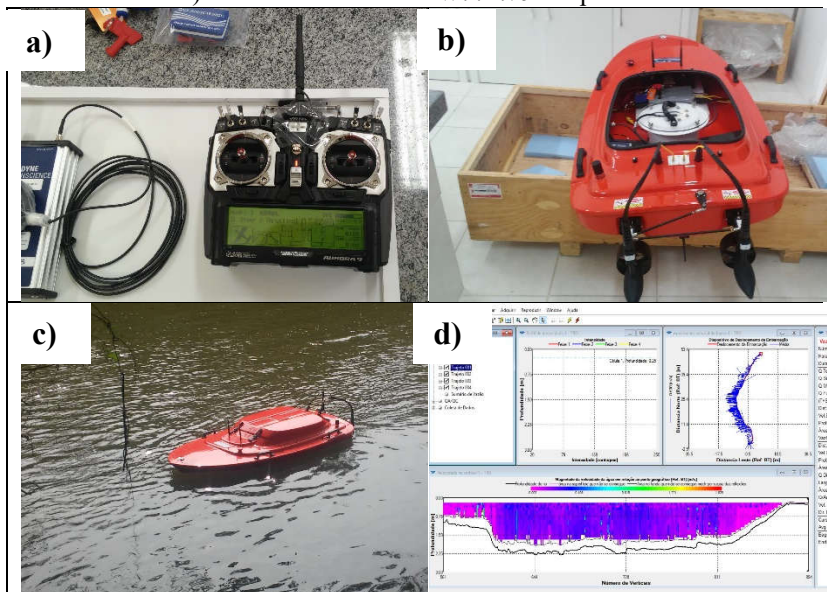
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 35 – Confirmação *in loco* de parâmetros físicos relacionados ao rio Carahá.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 36 – Equipamento *Q-boat* para confirmação *in loco* de parâmetros físicos relacionados ao rio Caveiras. a) Controle remoto e rádio do equipamento. b) Montagem no laboratório. c) Execução de perfil batimétrico. d) Interface do software *WinRiver 2* apresentando dados.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Na simulação do método de propagação, portanto, foram aplicados os valores estimados na Tabela 12 aos quatro trechos definidos para o rio Caveiras que recebe a entrada das sete sub-bacias definidas. Os parâmetros físicos referentes aos afluentes urbanos foram desconsiderados em razão de sua irrelevância no esquema conceitual da modelagem hidrológica e, por isso, armazenados para estudos futuros de modelagem hidrodinâmica.

Com relação ao coeficiente de *manning*, os trechos tiveram seus valores atribuídos de acordo com CHOW et al. (1959) e tiveram grandes diferenças entre si devido à equivalência indicada na literatura.

Tabela 12 – Parâmetros do método de propagação de onda *Muskingum-Cunge* para os trechos do rio Caveiras inseridos no sistema Caveiras Montante 1.

Trechos (relação com sub-bacias urbanas)	Comprimento (m)	Declividade do trecho (m/m)	Largura média do trecho (m)	Coefficiente de manning
Caveiras 1 (montante)	31.262,11	0,0082855	10	0,04
Caveiras 2 (montante)	25.211,08	0,00059827	20	0,12
Caveiras 3 (intermediário)	3.647,95	0,00035255	25	0,12
Caveiras 4 (jusante)	18.600,02	0,00058537	40	0,1

Fonte: Próprio Autor (2017).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados da modelagem hidrológica orientada por eventos, bem como, a verificação dos métodos de cálculo selecionados e a resposta hidrológica das sub-bacias para os eventos de inundação. A validade dos resultados da modelagem hidrológica foi avaliada por meio dos índices de qualidade de ajuste, além da análise dos cálculos de perda, transformação, escoamento subterrâneo e propagação de onda.

4.1 MODELAGEM ORIENTADA POR EVENTOS

Foram incluídos desde a forma de calibração dos eventos selecionados para este estudo até suas respectivas análises individuais, e os detalhes de otimização proporcionados pelo modelo HEC-HMS.

4.1.1 Calibração

Realizadas as constatações, cálculos e pré-processamentos, a modelagem hidrológica orientada por eventos com o modelo HEC-HMS teve a calibração e respectivos testes do modelo realizados por meio dos dados observados de séries históricas diárias de vazão e precipitação.

Iniciado o procedimento de calibração manual, o objetivo foi ajustar os parâmetros que melhor representam o comportamento da bacia. Portanto, foram determinados todos os parâmetros que puderam ser estimados por bibliografia, ortofotos e imagens de satélites, medições pontuais de campo e características físicas das sub-bacias. Em seguida, foi realizada a verificação destes mesmos parâmetros, no que diz respeito a análise de incerteza. O que ocorre com cada parâmetro em otimização é o uso das estatísticas descritivas que os relacionam com os resultados gerados pelo HEC-HMS. As iterações para indicar a sensibilidade do parâmetro no hidrograma simulado, isto é, se sua manipulação traz ou não mudanças significativas no resultado final, foram desenvolvidas de acordo com o método de Monte Carlo, disponível na versão do HEC-HMS 4.2 (SHAMSUDIN; DAN'AZUMI; RAHMAN, 2011).

A escolha dos parâmetros essenciais para calibração partiu da premissa básica de que a variação dos valores deste é sensível no hidrograma final. Dados os parâmetros usados e referências, os parâmetros de maior sensibilidade, foram os escolhidos para executar o processo de calibração na Tabela 13:

Tabela 13 – Limites para parâmetros de calibração utilizados pelo usuário.

Método de cálculo	Parâmetro	Limite Mínimo	Limite Máximo
Perdas – <i>SCS Curve Number</i>	Curva Número - CN	55	95
Escoamento de base - <i>Recession</i>	Constante de Recessão - <i>k</i>	0,3	0,99

Fonte: Próprio Autor (2017).

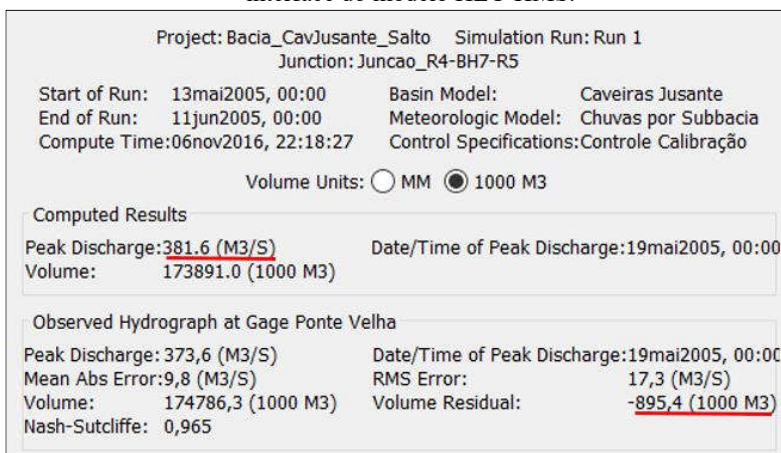
Aqueles irrelevantes no processo de calibração, foram mantidos os valores estimados inicialmente, no capítulo 3, buscando manter fixos devido a seu significado estritamente físico ou de estimativa mais precisa.

O último detalhe para executar o processo de calibração corretamente foi indicar o valor inicial do parâmetro, isto é, a partida da otimização, e a faixa de limites mínimo e máximo para realizar as iterações. Para o valor inicial, quanto mais próximo da realidade mais rápido é encontrado o valor ótimo. Quanto à faixa de limites, o próprio modelo HEC-HMS possui suas restrições padrão (Tabela 4), entretanto, a faixa de valores aceitáveis para o sistema Caveiras Montante 1 é limitada (Tabela 13) e segue os limites especificados, de acordo com o conhecimento das características físicas das sub-bacias de estudo apresentadas no capítulo 3.

A partir do momento em que o pico do hidrograma apresentou um ajuste razoável na calibração manual inicial, foi iniciada a etapa de otimização automática dos parâmetros do modelo HEC-HMS com os métodos iterativos especificados no capítulo 2. Dessa forma, num primeiro momento, a calibração foi realizada alternando entre o uso dos dois tipos de iteração existentes, *Univariate Gradient* quando na otimização individual e *Nelder Mead* quando na otimização conjunta. Em seguida, para o último refinamento dos valores foi executada novamente a calibração manual.

Partindo do fato de que se trata de uma modelagem orientada por eventos, durante a calibração, foram analisados os resultados prioritários, como a vazão de pico e o volume residual, indicados na Figura 37. Deste modo, tais resultados podem influenciar na tomada de decisão durante a calibração complementando aos índices de qualidade de ajustes.

Figura 37 – Resultados prioritários monitorados para calibração indicados na interface do modelo HEC-HMS.



Fonte: Próprio Autor (2017).

O monitoramento de tais resultados ao longo do processo de calibração permite uma calibração adequada para os eventos de cheia na estação fluviométrica Ponte Velha e também na determinação das vazões extremas para as sub-bacias urbanas de interesse Ponte Grande e Carahá.

Com base no exposto, após todo o processo de calibração, foi possível gerar os resultados de interesse nas tabelas 14 e 15, com o objetivo de apresentar a considerável melhora no cômputo dos processos hidrológicos pelo modelo HEC-HMS em virtude da otimização dos parâmetros assessorada pelos próprios resultados produzidos.

Tabela 14 – Volume observado, volume antes e após otimização na estação fluviométrica Ponte Velha.

Evento	Volume de Escoamento Superficial (m ³)		
	Observado	Simulado	
		Antes Otimização	Após Otimização
2005	1,75 x 10 ⁸	3,7 x 10 ⁸	1,74 x 10 ⁸
2008	2,85 x 10 ⁷	3,28 x 10 ⁷	2,85 x 10 ⁷
2011	1,42 x 10 ⁸	1,74 x 10 ⁸	1,42 x 10 ⁸

Fonte: Próprio Autor (2017).

Tabela 15 – Vazões de pico observadas, antes e após otimização na estação fluviométrica Ponte Velha.

Evento	Vazão de pico ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)		
	Observado	Simulado	
		Antes Otimização	Após Otimização
2005	373,6	509,6	381,6
2008	55,7	38,2	48,5
2011	282,5	283,8	284,1

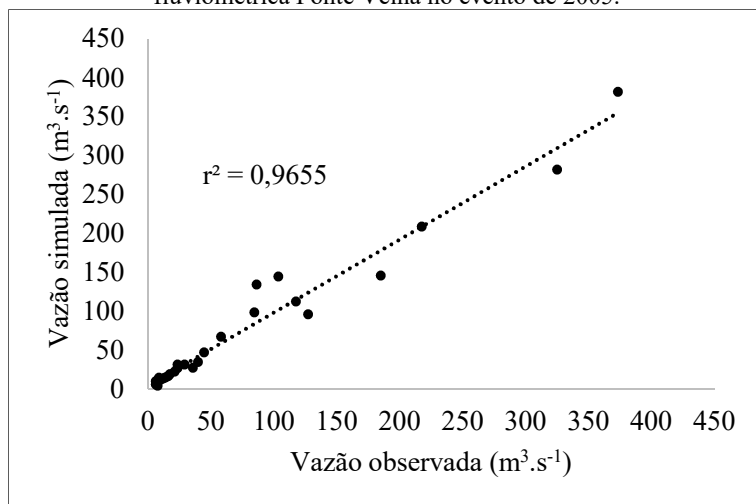
Fonte: Próprio Autor (2017).

O comportamento dos volumes simulados de escoamento superficial após a otimização praticamente coincidiu com os volumes observados de cada evento selecionado. Em relação a vazão de pico, durante a otimização este resultado teve comportamentos diferentes para cada evento.

No evento de 2005, houve uma vazão de pico superestimada antes e após a otimização, pois foi um evento muito severo. No evento de 2008, a vazão de pico simulada do rio Caveiras, na estação fluviométrica Ponte Velha, foi subestimada antes e depois da otimização devido à distribuição espacial da precipitação concentrada nas sub-bacias urbanas. Finalmente, no evento de 2011, antes da otimização dos parâmetros, o modelo já havia simulado uma vazão de pico próxima ao observado e após a otimização, houve ainda um afastamento entre esses valores devido à busca manual por aproximar os volumes de escoamento superficial para representar corretamente os processos hidrológicos.

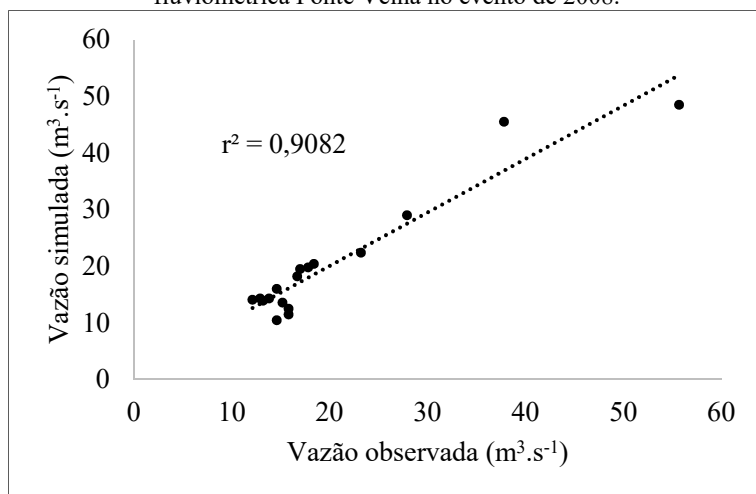
O coeficiente de determinação r^2 da dispersão dos dados simulados e observados (equação 15) foi calculado após a simulação, ou seja, externamente ao modelo para os períodos calibrados dos eventos. O propósito foi mensurar a qualidade do ajuste, enquanto que o coeficiente de NSE classificou as simulações com valores razoáveis (2011) ou ótimos (2005 e 2008).

Figura 38 – Gráfico de dispersão dos dados simulados e observados na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2005.



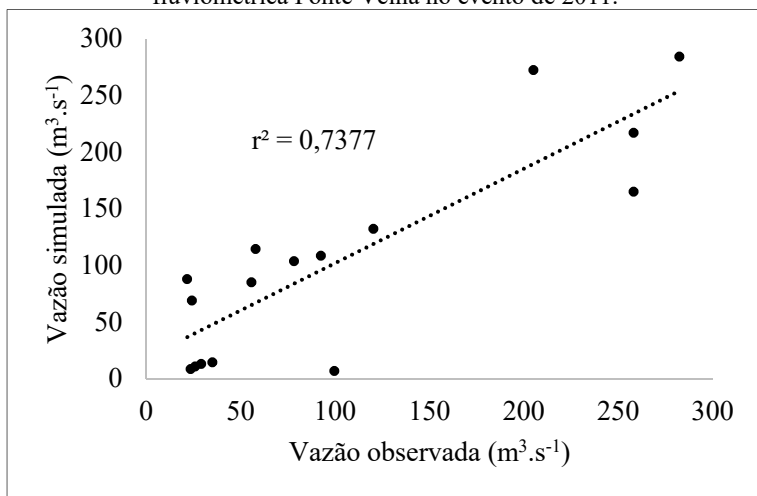
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 39 – Gráfico de dispersão dos dados simulados e observados na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2008.



Fonte: Próprio Autor (2017).

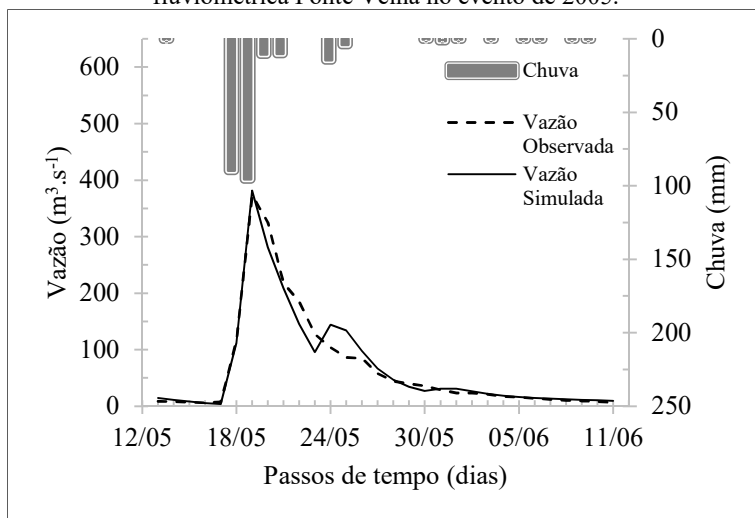
Figura 40 – Gráfico de dispersão dos dados simulados e observados na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2011.



Fonte: Próprio Autor (2017).

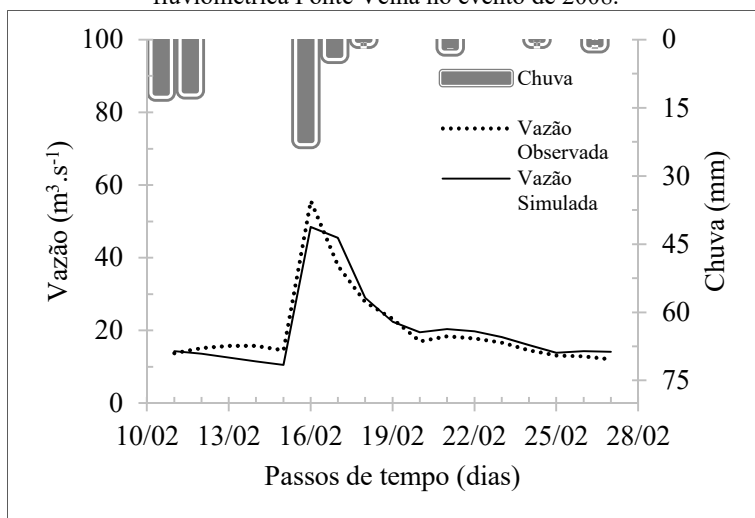
Os hidrogramas nas Figuras 41, 42 e 43 representam tais eventos calibrados em comparação com os hidrogramas observados disponíveis, além do hidrograma observado ponderado, ambos para o sistema Caveiras Montante 1.

Figura 41 – Comparação de hidrogramas observado e simulado na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2005.



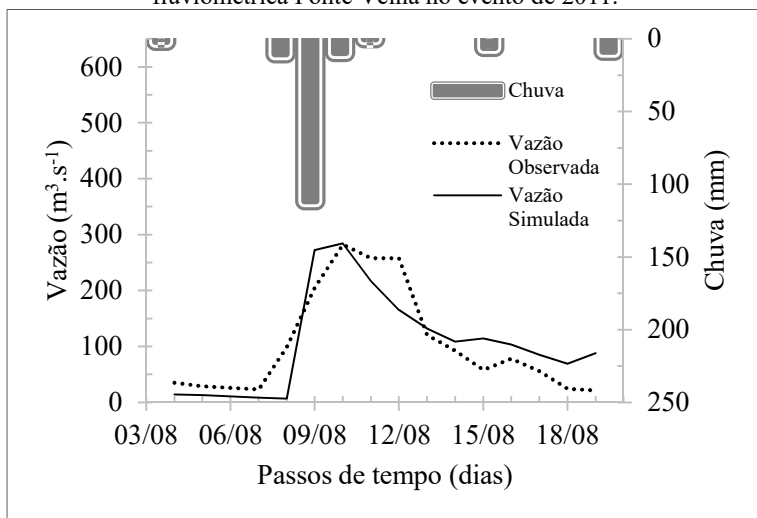
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 42 – Comparação de hidrogramas observado e simulado na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2008.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 43 – Comparação de hidrogramas observado e simulado na estação fluviométrica Ponte Velha no evento de 2011.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Após a devida calibração realizada para cada evento, foram utilizados como períodos de teste os próprios eventos entre si (Tabelas 16 e 17), a fim de permitir discussões sobre as diferenças mais sutis entre os eventos selecionados nos próximos itens. Para avaliar o desempenho do modelo, primeiramente foi verificado o índice de eficiência de NSE (equação 14) e o volume residual, isto é, a diferença entre o volume simulado e observado, ambos na própria interface do modelo.

Tabela 16 – Índice de Eficiência NSE no período de calibração e testes na estação fluviométrica Ponte Velha.

Calibração	Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE)		
	Teste		
	2005	2008	2011
2005	0,965	0,025	0,258
2008	0,131	0,906	0,411
2011	0,594	0,625	0,725

Fonte: Próprio Autor (2017).

Tabela 17 – Volume Residual no período de calibração e testes na estação fluviométrica Ponte Velha.

Calibração	Volume Residual (m ³)		
	Teste		
	2005	2008	2011
2005	-8,95 x 10⁵	-9,01 x 10 ⁶	7,43 x 10 ⁷
2008	1,90 x 10 ⁸	100,00	2,55 x 10 ⁷
2011	1,10 x 10 ⁸	-3,72 x 10 ⁶	900,00

Fonte: Próprio Autor (2017).

Os valores em negrito nas tabelas representam os eventos que foram calibrados, isto é, quando houve os melhores resultados. Com relação aos valores baixos de NSE e volume residual nos testes, apenas confirmam a hipótese de que na modelagem orientada por eventos, para que o período de teste seja validado, os eventos selecionados devem ser hidrologicamente similares em porte, distribuição espacial e temporal.

Por fim, a calibração pode ser considerada ideal em função dos eventos hidrológicos do mesmo porte do calibrado, visto que apresentou coeficientes de determinação r^2 com a mesma qualidade do índice NSE, de 0,9655 para 2005, 0,9082 para 2008 e 0,7377 para 2011.

4.1.2 Análise do evento de 2005

No evento dos dias 18 e 19/05/2005, conforme a Tabela 8, tem-se uma quantidade de chuva acumulada de 184 mm em 32 horas, tendo intensidade média mais elevada em relação aos outros dois eventos e, com isso, apresentando o maior tempo de retorno (384 anos).

Conforme o mapa de inundação oficial apresentado pela prefeitura (Figura 25) e com base no tempo de retorno muito superior aos outros dois eventos, este evento foi o mais severo de todos. Isso também pode ser verificado no Anexo A, que apresenta os danos causados na cidade de Lages para toda população que vive próxima aos afluentes urbanos.

O fato de a distribuição espacial da chuva ser disseminada pelo sistema Caveiras Montante 1, ocasionou ainda um aumento das vazões no exutório de todas as sub-bacias a montante das sub-bacias Ponte Grande e Carahá. Desta forma, estas atingiram suas vazões de pico simultaneamente com o rio Caveiras contribuindo ainda mais para severidade deste evento sistematizado no modelo HEC-HMS, podendo verificar isto nas manchas de inundação dos eventos (Figuras 25 a 27).

No hidrograma e índices apresentados anteriormente, obteve-se tal contribuição acumulada na estação fluviométrica Ponte Velha, a qual atingiu a maior vazão de pico comparada aos outros eventos e o modelo HEC-HMS pôde representar de maneira satisfatória atingindo uma vazão de pico de 381,6 m³/s e consequentes índice de eficiência NSE de 0,965 e coeficiente de determinação r^2 de 0,9655.

De forma geral, o hidrograma simulado teve ótima representação do ramo de ascensão, pico e parte final do ramo de recessão. Apenas na parte inicial do ramo de recessão não foi possível acompanhar o hidrograma observado do mesmo modo, o que pode estar relacionado com uma distribuição mais concentrada das chuvas ocorridas nas sub-bacias nos dias imediatamente posteriores ao do evento, e, no entanto, o modelo considerou-as de forma disseminada, assim como no evento de estudo em si. Deste modo, acusando uma leve ascensão ao longo do trecho de recessão que não é condizente com a realidade. O resultado disso pode ser verificado na Tabela 17, que apesar do ótimo valor de NSE e r^2 , indicou o pior volume residual em relação a simulação dos outros dois eventos.

Por fim, o evento de 2005 apresentou ótimos resultados na otimização dos processos hidrológicos presentes nas sub-bacias e estes podem ser utilizados para confirmar o uso das vazões determinadas para as sub-bacias urbanas Ponte Grande e Carahá, que não possuem séries de vazões observadas.

4.1.3 Análise do evento de 2008

No evento dos dias 15 e 16/02/2008, conforme Tabela 8, tem-se uma quantidade de chuva acumulada de 104 mm, com a menor duração, de 4 horas e 30 minutos seguidos e intensidade mais alta em relação aos outros dois eventos, obtendo-se tempo de retorno de 29 anos.

De acordo com o tempo de retorno, este evento teve severidade bem mais branda em relação ao de 2005. Apesar disso, devido à sua curta duração e alta intensidade média, os danos causados na cidade de Lages em 2008 foram severos, o que pode ser verificado no Anexo B e também no mapa oficial de inundação (Figura 26) que, diferente dos outros dois eventos, apresenta alagamentos decorrentes da drenagem urbana inadequada.

A distribuição espacial da chuva no evento de 2008 foi bem concentrada apenas nas sub-bacias urbanas, o que contribuiu para seus alagamentos característicos da sub-bacia Carahá. Também é perceptível que a vazão do rio Caveiras não possui pico proporcional ao encontrado

nas sub-bacias urbanas, fazendo com que, de fato, este evento fosse considerado diferente em relação aos outros pelo modelo HEC-HMS. Na Tabela 16, é possível verificar a grande diferença hidrológica entre os eventos de 2005 e 2008, por exemplo, ao se analisar os baixos valores de NSE quando calibrado em 2005 e realizado o teste em 2008, ou vice-versa.

Quanto à análise do hidrograma, percebe-se a baixa vazão de pico comparada aos outros eventos e como o modelo HEC-HMS pôde representar de maneira satisfatória, entretanto, subestimando tal índice em relação ao dado observado ao atingir uma vazão de pico de $48,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e consequente NSE de 0,906 e coeficiente de determinação r^2 de 0,9082.

Assim sendo, o hidrograma simulado teve representação aproximada do ramo de ascensão e pico, o que pode se explicar devido à distribuição espacial mais concentrada do evento nas sub-bacias, ou seja, dificulta a simulação do pico mais brando do rio Caveiras em evento tão severo. No ramo de recessão, houve melhor representação da realidade e foi possível acompanhar o hidrograma observado em vazões menores. O resultado disso pode ser verificado na Tabela 17, que indicou o melhor volume residual em relação a simulação dos outros eventos.

Portanto, o evento de 2008 também apresentou bons resultados na otimização dos processos hidrológicos presentes nas sub-bacias e estes podem ser utilizados para confirmar o uso das vazões encontradas nas sub-bacias urbanas Ponte Grande e Carahá, que não possuem séries de vazões observadas.

4.1.4 Análise do evento de 2011

No evento dos dias 08 e 09/08/2011, conforme Tabela 8, se tem uma quantidade de chuva acumulada de 123,6 mm para a maior duração, de 35 horas seguidas, entretanto, com a menor intensidade em relação aos outros dois eventos e obtendo-se o menor tempo de retorno (22 anos).

Com relação à severidade do evento, baseado no tempo de retorno, este evento foi o mais brando em comparação aos outros. Mesmo assim, devido à sua longa duração, foram verificados danos na cidade de Lages tão severos quanto nos eventos anteriores.

Quanto à distribuição espacial da chuva no evento de 2011, ela foi bem distribuída, o que ocasionou um aumento das vazões no exutório de todas as sub-bacias a montante das sub-bacias Ponte Grande e Carahá, atingindo o pico de vazão simultaneamente com o rio Caveiras, da mesma forma como para o evento de 2005.

Pode-se verificar tal contribuição acumulada na estação fluviométrica Ponte Velha, mesmo observando que o modelo HEC-HMS pôde atingir um índice de NSE menor em relação aos outros, de 0,725, e coeficiente de determinação r^2 de 0,7377. Ao representar de maneira satisfatória a vazão de pico de 284,1 m³/s é constatado também valores razoáveis de NSE para os testes de 2005 e 2008, calibrados a partir do evento de 2011, com NSE de 0,594 e 0,625 respectivamente.

Ao analisar o hidrograma simulado, observa-se uma representação inadequada dos tempos de ascensão e recessão do evento. Além disso, é perceptível o deslocamento do ramo de ascensão, pico e ramo de recessão no gráfico apresentado, confirmando que o que garante o valor de NSE superior a 0,7 é o bom alcance da vazão de pico e ótimo índice de volume residual.

Enfim, o evento de 2011, de forma geral, apresentou resultados satisfatórios na otimização dos processos hidrológicos presentes nas sub-bacias. Apesar de ter necessidade de verificação dos processos hidrológicos que envolvem os parâmetros otimizados, recomenda-se realizar análise mais detalhada de consistência dos dados observados e uma ponderação de chuvas com maior densidade de estações pluviométricas. Assim, mesmo com tais entraves, será feito o uso das vazões encontradas nas sub-bacias urbanas Ponte Grande e Carahá.

4.2 VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO

Como descrito no capítulo 2, foram selecionados diferentes métodos de cálculo para construção dos hidrogramas das sub-bacias. A seguir serão verificadas e discutidas as peculiaridades dos quatro métodos utilizados especificamente para as sub-bacias urbanas de interesse.

Buscando esclarecer a influência principal que cada parâmetro tem sobre o índice de eficiência NSE e, conseqüentemente, sobre o hidrograma de cada sub-bacia, a Tabela 18 os identifica em conjunto com as condições consideradas na calibração:

Tabela 18 – Efeito principal e forma de calibração de parâmetros no HEC-HMS para a bacia de estudo.

Parâmetro	Influência principal no hidrograma	Condição de calibração
Manning (n)	Tempos de ascensão e recessão	Fixo
Tempo de Retardo (T_{Lag})	Tempos de ascensão e recessão	Fixo
Vazão Inicial (Q_0)	Ramo de ascensão	Fixo
Limiar de Recessão (<i>threshold</i>)	Ramo de recessão	Fixo
<i>Curve Number</i> (CN)	Vazão de pico do evento	Otimizado
Constante de recessão (k)	Ramo de recessão	Otimizado

Fonte: Próprio Autor (2017).

Como visto na tabela acima, os parâmetros relacionados com o volume e a geração de escoamento superficial são utilizados para estimar a vazão de pico do evento, enquanto que os relacionados com o escoamento de base influenciam na estimativa da declividade dos ramos de ascensão e recessão. Quanto às condições de calibração apresentadas, quando o parâmetro foi deixado fixo considerou-se os valores estimados no capítulo 3 devido a sua indiferença no hidrograma final. O CN e a constante de recessão k foram os únicos parâmetros otimizados, visto que sua calibração possui influência sobre a representação dos processos hidrológicos.

Na tabela 19 são apresentados os parâmetros otimizados desde sua estimativa inicial até os obtidos para cada um dos eventos selecionados:

Tabela 19 – Parâmetros otimizados para as sub-bacias nos eventos selecionados.

Sub-bacia	Parâmetro	Valor Inicial	Valor otimizado		
			2005	2008	2011
Caveiras	CN	71,392	73,500	57,093	71,050
Montante2	k	0,9	0,94908	0,84268	0,7475
UDESC	CN	71,831	57,408	63,361	75,455
Painel	k	0,9	0,64903	0,97693	0,6342
Caveiras	CN	69,720	62,113	60,349	68,873
Lages	k	0,9	0,62792	0,85459	0,83482
Ponte Grande	CN	80,744	74,120	92,518	80,306
	k	0,9	0,91938	0,57892	0,79716
Carahá	CN	82,158	85,652	94,987	84,534
	k	0,9	0,91884	0,57908	0,69345
Entre Rios	CN	71,530	71,162	68,648	73,474
	k	0,9	0,89241	0,71279	0,84149
Ponte Velha	CN	70,938	56,916	77,927	70,750
	k	0,9	0,62202	0,91848	0,87461

Fonte: Próprio Autor (2017).

Com relação aos distantes valores entre os eventos para o mesmo parâmetro e sub-bacia, estes se justificam em função de cada um ser hidrológicamente diferente em relação ao porte, distribuição espacial e temporal, conforme discutido anteriormente.

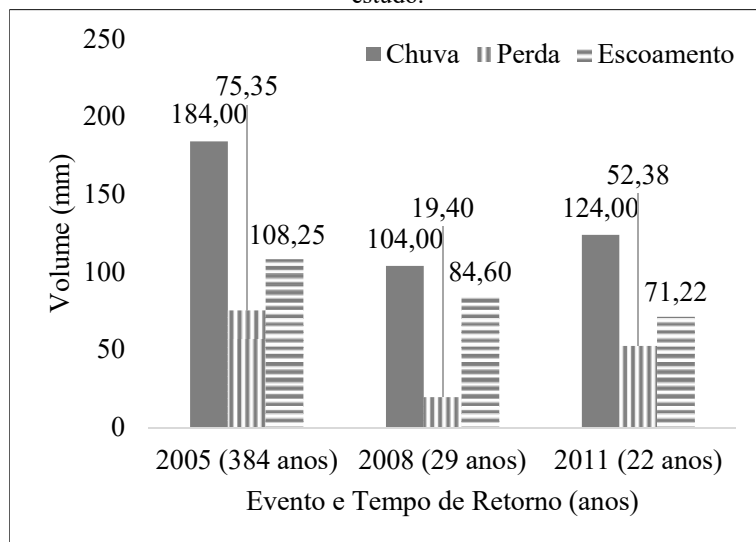
Ainda, de acordo com os valores apresentados, pode-se discutir dois resultados importantes, que são as diferenças visíveis na capacidade de geração de escoamento superficial de cada sub-bacia, através do CN, e a contribuição antecedente em que se encontra a sub-bacia durante os eventos selecionados, através da constante de recessão. Nos itens a seguir serão abordadas tais constatações de forma mais detalhada.

4.2.1 Cálculo de Perdas da chuva

O método selecionado para Perdas no modelo HEC-HMS, o SCS (atualmente NRCS) *Curve Number*, foi verificado ser o mais sensível dos parâmetros. Isso se deve ao fato de que já inclui em suas perdas os 20% de abstração inicial padrão, a porcentagem de impermeabilidade da sub-bacia, e ainda, abrange as perdas correspondentes ao método de Superfície e de Interceptação, simplificando a modelagem hidrológica ao garantir uma boa simulação sem a necessidade de empregar tais métodos de cálculo também disponíveis no HEC-HMS (USACE, 1994).

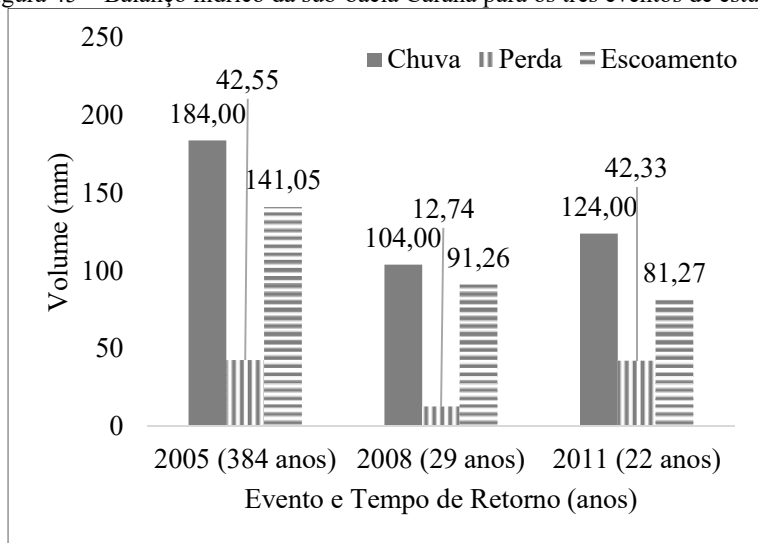
A seguir, encontram-se os volumes globais dos eventos relacionados a chuva, perdas por infiltração e escoamento superficial proveniente da chuva efetiva, apenas para as sub-bacias urbanas de interesse:

Figura 44 – Balanço hídrico da sub-bacia Ponte Grande para os três eventos de estudo.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 45 – Balanço hídrico da sub-bacia Carahá para os três eventos de estudo.



Fonte: Próprio Autor (2017).

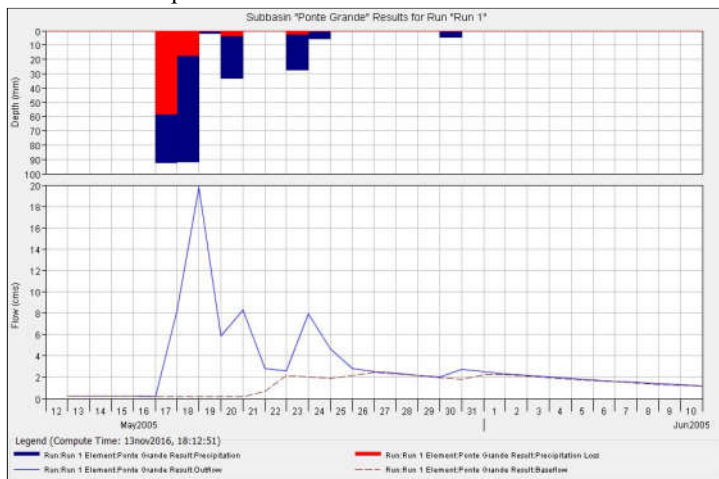
Após uma análise detalhada dos volumes globais dos eventos para cada sub-bacia urbana, pode-se destacar que o evento de 2008 foi o que produziu maior volume de escoamento superficial, proporcionalmente à quantidade de entrada de água na sub-bacia, devido à menor duração em relação aos outros dois. Também é possível visualizar que a sub-bacia Ponte Grande possui valores maiores de perdas por infiltração, detenção, retenção e/ou interceptação, e consequentemente, valores menores de escoamento superficial em relação a sub-bacia Carahá, consequência direta dos valores de CN inferiores, apresentados na Tabela 12.

Outro detalhe relevante é o fato de as perdas serem menores do que 50% da entrada de água para todos os eventos nas sub-bacias urbanas, não possuindo grandes diferenças. Isso se deve ao fator limitante de que o CN levado em consideração calcula o volume de escoamento superficial de acordo com determinada intensidade, duração e severidade da quantidade de chuva responsável pela vazão de pico. Ou seja, de acordo com o evento selecionado, houve um CN novo otimizado para a mesma sub-bacia.

Sobre as perdas ocorridas ao longo dos dias de simulação, de forma geral, estas podem ser identificadas mais detalhadamente nas figuras a seguir para cada um dos eventos selecionados nas sub-bacias

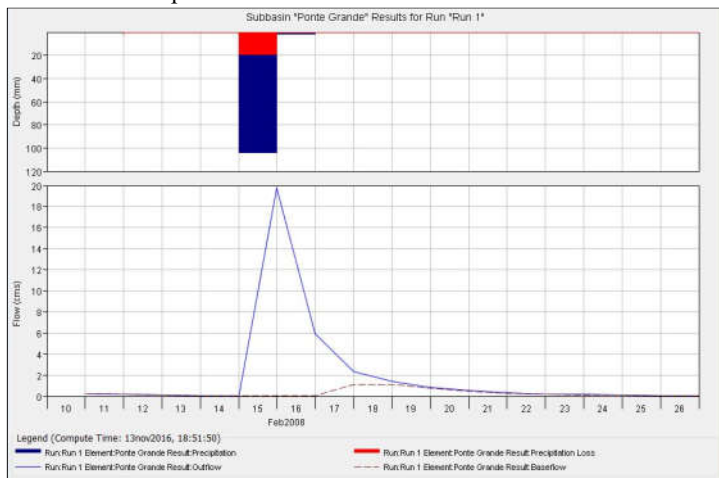
urbanas de interesse. Nos resultados do HEC-HMS, a sub-bacia Ponte Grande apresentou os valores de CN de 74,12, 92,52 e 80,31 para 2005, 2008 e 2011, respectivamente:

Figura 46 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Ponte Grande em 2005.



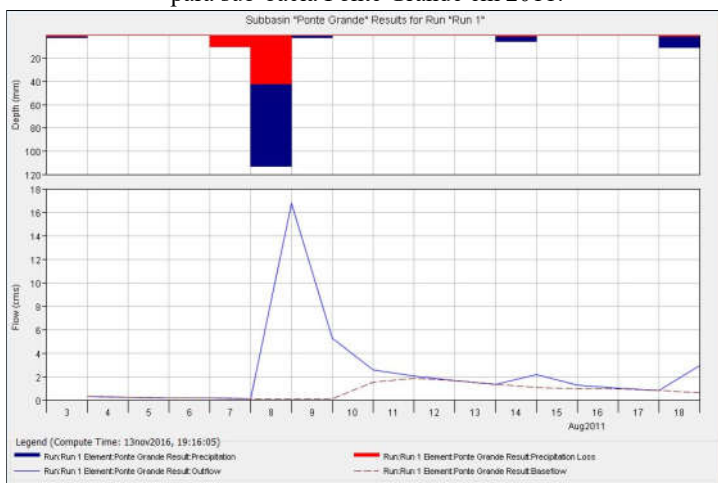
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 47 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Ponte Grande em 2008.



Fonte: Próprio Autor (2017).

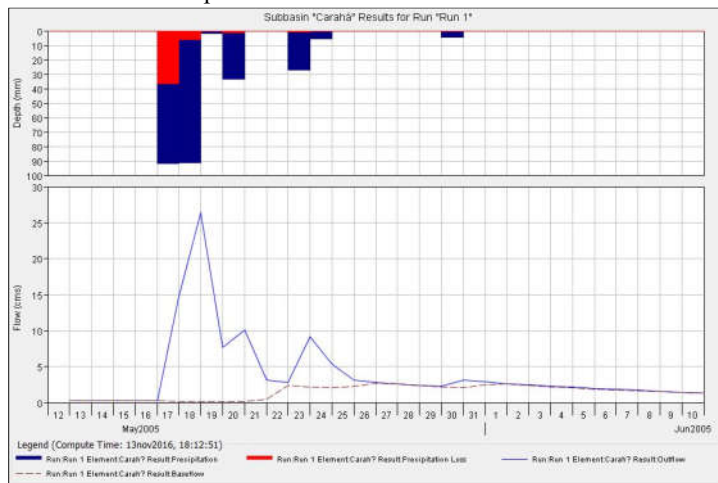
Figura 48 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Ponte Grande em 2011.



Fonte: Próprio Autor (2017).

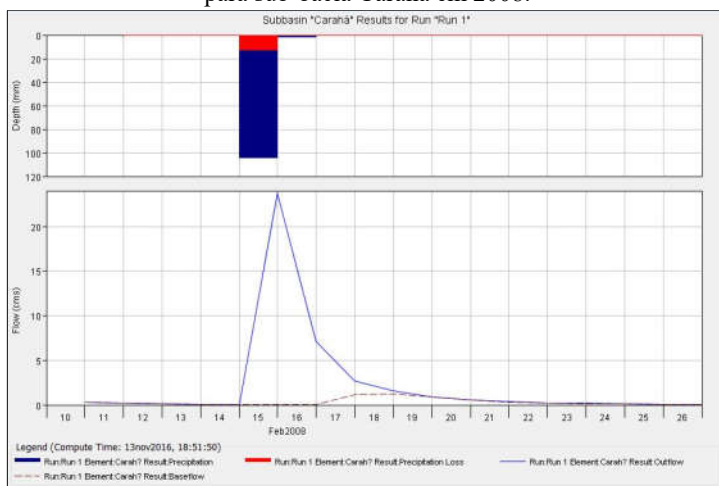
Na sub-bacia Carahá foram encontrados os valores de CN de 85,65, 94,99 e 84,53 para 2005, 2008 e 2011 respectivamente:

Figura 49 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Carahá em 2005.



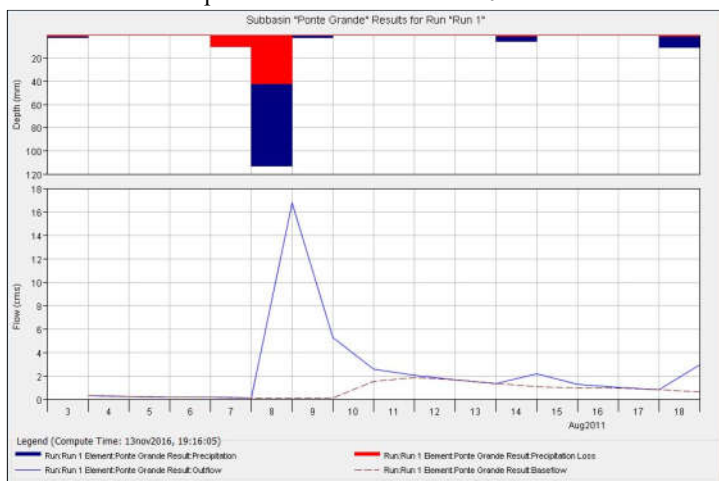
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 50 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Carahá em 2008.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 51 – Perdas simuladas no hietograma e respectivo hidrograma simulado para sub-bacia Carahá em 2011.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Baseando-se nas figuras apresentadas, pode-se entender a forma de interpretação do modelo HEC-HMS, ao atribuir a perda (parcela em vermelho da coluna) ao volume de escoamento superficial das áreas permeáveis, e iniciando o desenvolvimento da recessão do hidrograma até o escoamento subterrâneo (linha pontilhada), que será ajustado em definitivo pelo método de escoamento de base de recessão. Também fica visível na estimativa da vazão de pico o uso do escoamento superficial das áreas impermeáveis (parcela em azul da coluna).

Uma das principais limitações do método SCS-CN é que, durante a modelagem de um evento de grande duração como o de 2005 e 2011, a taxa de infiltração eventualmente se aproxima de zero (NRCS, 1986). Tal problema ocorre devido às perdas para cada passo de tempo que são proporcionais às diferenças entre a chuva acumulada no início e no fim de cada intervalo. Além disso, a intensidade e a duração da precipitação são negligenciadas neste método, de modo que uma precipitação de 50 mm/dia, resulta na mesma perda cumulativa que uma precipitação de 50 mm/h. Isso explica porque o problema é ainda mais intensificado no caso deste estudo, quando o intervalo de simulação está arranjado num bloco diário, ou seja, se a intensidade da chuva aumentar ou diminuir de um dia para o outro, as perdas variam drasticamente em razão do tamanho do passo de tempo.

Mesmo assim, trata-se de um método simples, previsível e estável, amplamente aceito para uso nos EUA e no exterior (USACE, 2000). Além disso, o procedimento computacional usado no HEC-HMS considera um componente de tempo para o SCS-CN, calculando quantidades de precipitação efetiva para intervalos sucessivos em um evento extremo, como apresentado nas figuras 46 a 51. Uma vez que o CN é o único parâmetro de entrada utilizado, a estimativa correta foi crucial para a precisão dos resultados da modelagem, tal que esta análise prova que o modelo HEC-HMS é capaz de simular eventos de diferentes severidades, mesmo com dados diários.

4.2.2 Cálculo de Transformação chuva-vazão

O maior problema comentado na verificação do método de perda de chuva, pode ser melhor descrito neste item ao se esclarecer como o intervalo de simulação influencia os tempos de ascensão e recessão do pico do hidrograma, ao transformar a chuva em vazão com o SCS (atual NRCS) *Unit Hydrograph*.

Quanto às limitações, um dos principais pressupostos ao aplicar um HU sintético, como o método SCS-UH, é que o processo de

escoamento é linear. Isso significa que o dobro da quantidade de precipitação efetiva durante um intervalo de tempo especificado, neste caso diário, também gera o dobro de escoamento superficial do hidrograma (USACE, 2000). Existe ainda a incerteza, que está frequentemente envolvida nos resultados gerados e na falta de conhecimento dos processos de escoamento que ocorrem nas sub-bacias. Além disso, presume-se que a precipitação seja uniformemente distribuída sobre a sub-bacia que foi atribuída um determinado valor de chuva e a intensidade desta não interfere nos tempos dos hidrogramas.

O fato de o hidrograma unitário ser amplamente utilizado na estimativa de vazões extremas independente desses pressupostos, é devido à simplicidade de cálculo, bem como às dúvidas relacionadas a outros processos de modelagem mais complexos. Logo, é sugerido que o uso de métodos mais simples, como o SCS-UH, pode resultar em maior precisão na modelagem de bacias pequenas (MAIDMENT, 1993) como é o caso das sub-bacias Ponte Grande, Carahá e Entre Rios.

Assim, a aplicação do SCS-UH, requer normalmente o conhecimento de precipitações com durações inferiores a 24 horas, resultantes do estudo estatístico de dados pluviométricos, que em geral não são muito abundantes.

Ao realizar as simulações, conforme descrito em sua formulação no capítulo 2, o próprio modelo HEC-HMS indica um aviso de que o intervalo de simulação é maior do que 29% do tempo de retardo e sugere reduzir o intervalo de simulação, ou seja, deverá haver atenção na transformação chuva-vazão porque o tempo entre o centro de massa da chuva e a ocorrência da vazão de pico é muito pequeno para o intervalo de simulação empregado. Com base nisso, o intervalo de tempo ideal para as simulações seria de no máximo 20 minutos, verificando-se o menor tempo de retardo proveniente da sub-bacia Entre Rios. No entanto, é evidente o fato de que não existem dados observados de vazão para as sub-bacias de estudo em tal escala, forçando tal limitação ao modelo.

Foram mantidos fixos os valores dos tempos de retardo (parâmetro *Lag time* calculado) das sub-bacias, pois, além de não terem grande sensibilidade na calibração, também poderiam atingir valores sem significado físico ao otimizá-lo com um intervalo de simulação diário. Deste modo, assim como para o método anterior, neste estudo o modelo HEC-HMS tem capacidade de transformar a chuva em escoamento superficial, porém, com certas limitações.

4.2.3 Separação do Escoamento de Base

Quanto à verificação do método de recessão para aplicação no presente estudo, o mesmo foi capaz de realizar de forma satisfatória a separação dos hidrogramas do escoamento de base e o escoamento superficial, principalmente por ter sido empregado o uso da calibração orientada por eventos e não com o uso de séries contínuas.

Isso se deve ao fato de que a calibração orientada por eventos não tem capacidade de determinar o balanço hídrico subterrâneo e subsuperficial antecedentes e, portanto, como o balanço não é conhecido, é empregada uma abordagem empírica para relacionar os parâmetros do modelo com as características de recessão do hidrograma (USACE, 1994), como descrito no capítulo 2.

A recessão do hidrograma é dominada pelo escoamento de base no ponto em que o escoamento superficial e subsuperficial cessam e tal situação é estritamente indicada pelos valores dos parâmetros citados, principalmente a constante de recessão, que foi otimizada para representar adequadamente os processos hidrológicos. Desta forma, de acordo com a Tabela 19, os valores da constante de recessão para a sub-bacia Ponte Grande foram 0,91938, 0,57892 e 0,79716 para 2005, 2008 e 2011, respectivamente. Quanto à sub-bacia Carahá, os valores otimizados da constante de recessão foram 0,91884, 0,57908 e 0,69345 para 2005, 2008 e 2011, respectivamente.

Assim, com base na Tabela 10 (PILGRIM e CORDERY, 1992), em ambas as sub-bacias Ponte Grande e Carahá, para acompanhar o hidrograma observado, no evento de 2005 houve contribuição subterrânea antecedente ao evento devido à longa duração e nos eventos de 2008 e 2011 foi considerada a contribuição subsuperficial anterior aos eventos em razão dos volumes de chuva serem menores. Estas constatações complementam a caracterização dos eventos selecionados com a severidade, distribuição espacial e distribuição temporal dos mesmos.

Então, conforme destacado com linhas pontilhadas nas figuras 46 a 51, a simulação do escoamento de base segue a hipótese de que o aquífero é poroso e homogêneo com uma única resposta característica percebida a partir da recessão do hidrograma, confirmando assim a aptidão do modelo HEC-HMS para este trabalho.

4.2.4 Cálculo da Propagação de onda do canal

O método de cálculo empregado na propagação de onda do canal, *Muskingum-Cunge*, trata-se de uma técnica para computar e transferir os volumes correspondentes de sub-bacias a montante e as vazões provenientes de afluentes do rio principal. Ou seja, tal técnica realiza a transferência de hidrogramas ou volumes de uma sub-bacia a montante para a de jusante.

Quanto a suas limitações, a principal é a de que não computa efeitos de remanso, uma hipótese relevante para estudos futuros nas áreas de inundações deste trabalho. Isso reforça ainda mais o emprego da modelagem hidráulica para delimitação correta de como a difusão dos volumes gerados é executada, principalmente nas sub-bacias urbanas de interesse.

Devido às equações que foram adicionadas ao método de *Muskingum*, a fim de determinar os parâmetros de entrada de uma forma baseada em características físicas, um dos problemas do método *Muskingum-Cunge* é a estimativa correta do passo de tempo e da distância na solução das equações.

Portanto, o principal motivo para a escolha deste método para o presente trabalho são que os parâmetros são baseados nas propriedades físicas dos canais e principalmente porque seus cálculos são solucionados independentemente do intervalo de simulação empregado, o que confirma sua aplicabilidade para este trabalho com séries diárias de vazão e precipitação.

4.3 RESPOSTA HIDROLÓGICA DO SISTEMA

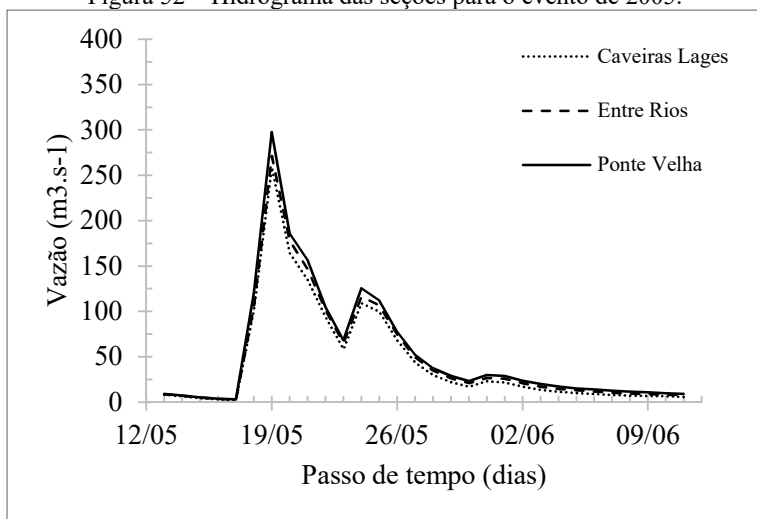
As calibrações e testes orientados a eventos realizados no modelo HEC-HMS, com base em séries temporais observadas na estação fluviométrica Ponte Velha, de acordo com as análises feitas, foram capazes de estimar a vazão das sub-bacias urbanas, além dos hidrogramas de montante (Caveiras Lages), intermediário (Entre Rios) e jusante (Ponte Velha) de tais sub-bacias para os eventos que proporcionaram a ocorrência de desastres por inundação. Deste modo, foram analisadas as sub-bacias urbanas e suas respostas hidrológicas após cada um dos eventos selecionados.

4.3.1 Resposta do sistema Caveiras Montante 1

Com o objetivo de entender o comportamento hidrológico das sub-bacias durante os eventos, foram estabelecidos pontos específicos do esquema conceitual criado para análise. Logo, foram gerados os hidrogramas correspondentes a uma seção logo a montante das sub-bacias urbanas denominada Caveiras Lages, uma seção intermediária denominada Entre Rios e uma seção a jusante das mesmas denominada Ponte Velha, para cada evento.

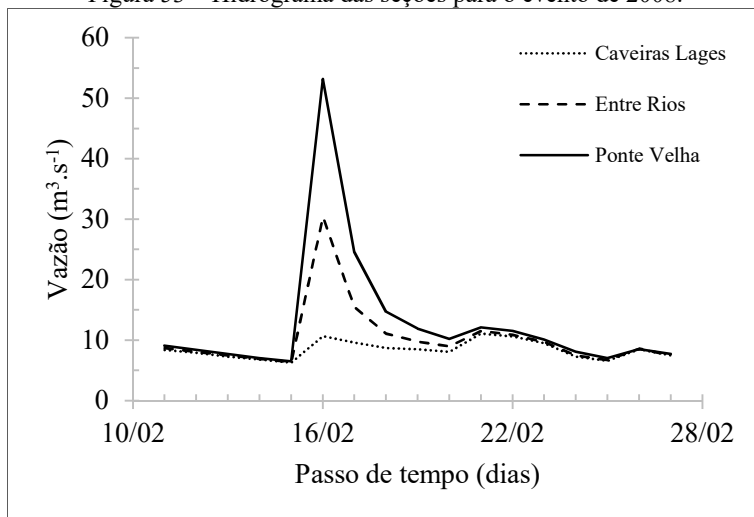
A seção de montante foi assim denominada por representar o hidrograma gerado para o exutório da sub-bacia Caveiras Lages. A seção intermediária teve sua definição em função de representar o hidrograma do exutório da sub-bacia Entre Rios, que indica o trecho do rio Caveiras entre os exutórios dos afluentes urbanos. E ainda, a seção de jusante teve tal nomenclatura por representar a soma da vazão dos afluentes urbanos junto ao rio Caveiras até montante da sub-bacia Ponte Velha.

Figura 52 – Hidrograma das seções para o evento de 2005.



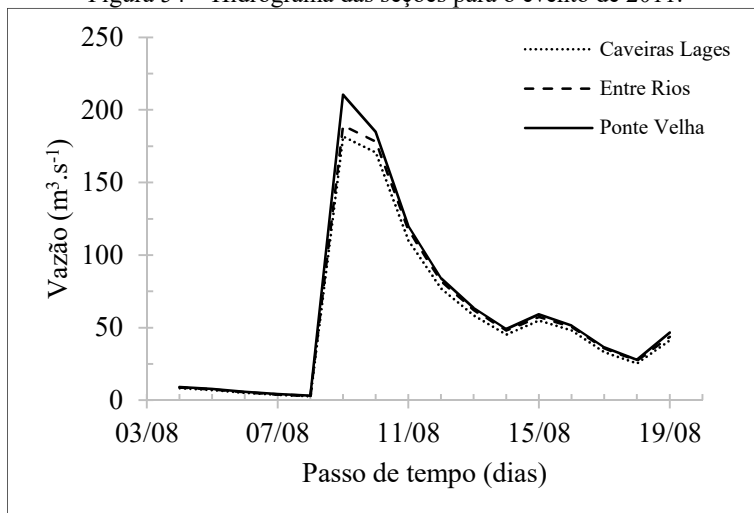
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 53 – Hidrograma das seções para o evento de 2008.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 54 – Hidrograma das seções para o evento de 2011.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Ao analisar os resultados em conjunto apresentados pelos hidrogramas nas figuras 52 a 54, configura-se como os volumes de escoamento se conformam no rio Caveiras e nos seus afluentes urbanos

na planície de inundação durante os eventos selecionados. Isto quer dizer que os hidrogramas simultâneos permitem identificar as interferências da entrada dos afluentes urbanos no rio Caveiras e vice-versa.

Nos anos de 2005 e 2011 é possível observar a distribuição espacial disseminada da chuva, enquanto que no ano de 2008 fica evidente a chuva concentrada nas sub-bacias urbanas, o que valida o fato de não ser delimitada nenhuma área inundável no rio Caveiras (Figura 26) em função de sua baixa vazão. Essa constatação é admitida em função dos valores de vazão calculados nos afluentes urbanos que superaram o próprio rio Caveiras em mais de 10 m³/s durante o evento (tabela 20).

Tabela 20 – Vazão de pico das seções escolhidas para os eventos.

Resultados HEC-HMS				
Variável	Data do pico do evento	Caveiras Lages (montante)	Entre Rios (intermediário)	Ponte Velha (jusante)
Vazão	19/05/2005	258,7	278,4	297,7
de pico	16/02/2008	10,7	30,4	53,2
(m ³ .s ⁻¹)	09/08/2011	181,8	198,5	210,4

Fonte: Próprio Autor (2017).

A análise do comportamento hidrológico do rio Caveiras durante os eventos extremos em Lages permite inferir que a relação deste com seus afluentes urbanos representa uma área que pode ser constantemente afetada por inundações tanto devido a eventos extremos nas sub-bacias de montante (Caveiras Montante 2, UDESC Painel e Caveiras Lages) como eventos extremos concentrados e pontuais (Ponte Grande e Carahá). No primeiro caso, pode-se recomendar como estudo futuro a modelagem hidrodinâmica para mais detalhes em relação aos canais envolvidos como avaliar a possibilidade de remanso hidráulico do rio Caveiras para os afluentes urbanos.

Foi detalhado, a seguir, o comportamento das duas sub-bacias urbanas de modo individual para entender como as inundações dos anos de 2005, 2008 e 2011 se propagaram de acordo com sua geometria espacial e variáveis hidrológicas calculadas.

4.3.2 Resposta das sub-bacias urbanas

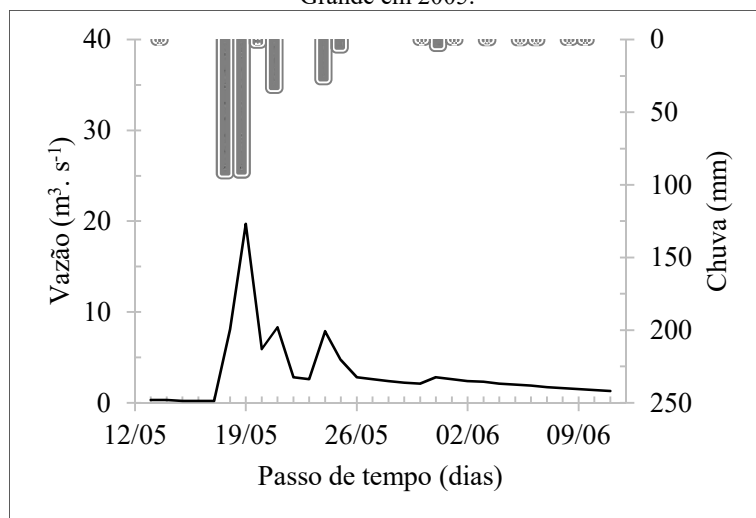
As respostas hidrológicas nas sub-bacias urbanas Ponte Grande e Carahá foram analisadas separadamente, a fim de construir um

prognóstico hidrológico para tais rios quando se encontram sob efeito de eventos extremos de chuva, sejam eles bem disseminados (2005 e 2011) ou concentrados na cidade de Lages (2008). Diferentemente dos hietogramas apresentados anteriormente para estação Ponte Velha, estes também puderam ser analisados a seguir com os hietogramas correspondentes às sub-bacias urbanas.

4.3.2.1 Bacia hidrográfica do rio Ponte Grande

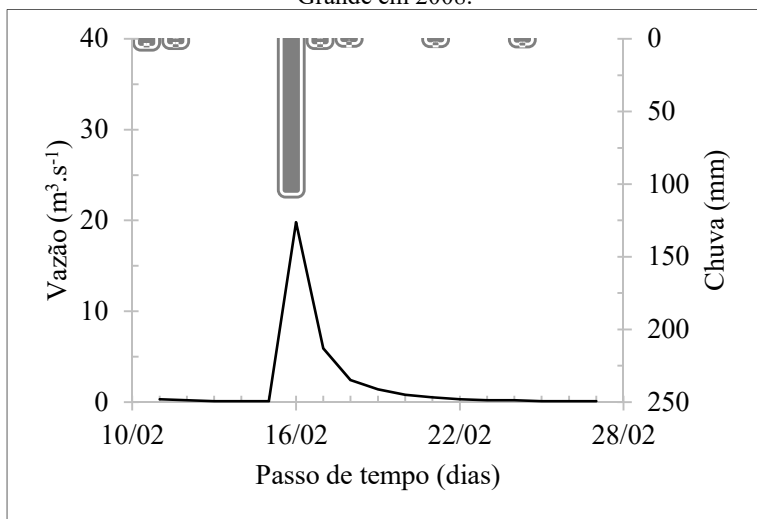
Na sub-bacia Ponte Grande, foram gerados abaixo os hidrogramas para cada um dos eventos selecionados (Figura 55 a 57). Em destaque, pode-se verificar a vazão de pico.

Figura 55 – Hietograma observado e hidrograma simulado na sub-bacia Ponte Grande em 2005.



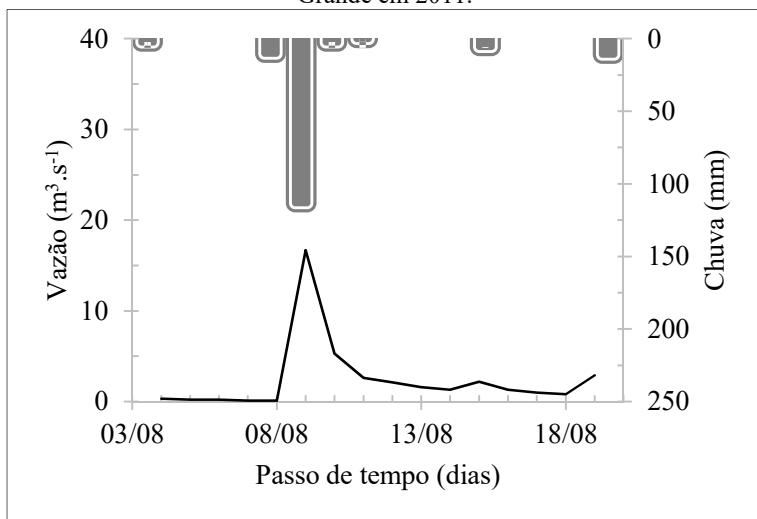
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 56 – Hietograma observado e hidrograma simulado na sub-bacia Ponte Grande em 2008.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 57 – Hietograma observado e hidrograma simulado na sub-bacia Ponte Grande em 2011.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Com base nos hidrogramas calculados apresentados, a tabela 21 sintetiza os resultados das simulações para cada evento:

Tabela 21 – Resultados do modelo HEC-HMS para a sub-bacia Ponte Grande e comparação com vazão de pico calibrada no rio Caveiras.

Sub-bacia Ponte Grande				Vazão de
Tempo de	Data do pico do	Volume de	Vazão	Pico
Retorno (anos)	Evento	Escoamento	de	Caveiras
		Superficial	pico	Montante
		(m ³)	(m ³ /s)	1 (m ³ /s)
384	19/05/2005	2,939 x 10 ⁶	19,7	381,6
29	16/02/2008	2,297 x 10 ⁶	19,8	48,5
22	09/08/2011	1,934 x 10 ⁶	16,7	284,1

Fonte: Próprio Autor (2017).

Percebe-se na sub-bacia Ponte Grande que o volume de escoamento superficial direto, está de acordo com a severidade do evento. Ou seja, quanto mais severo o evento maior a quantidade de água escoada na bacia e espera-se o maior risco de desastre por inundação, visto que a calha não é capaz de transportar tamanhos volumes.

Com relação aos picos, os mesmos não seguem tal ordenamento, pelo fato de que estão atrelados à intensidade e à distribuição espacial dos eventos. Por fim, as vazões de pico ainda podem ser utilizadas para fins de comparação ao fazer uma analogia em que a vazão alcançada durante os eventos no rio Ponte Grande é próxima daquela em regime normal na calha do rio Caveiras, o que já indica a quantidade imensa de volume de água que é simulada na pequena calha do rio Ponte Grande.

Pode-se destacar que no mapa de inundação do ano de 2005 (Figura 25) não foi delimitada nenhuma área de inundação dentro da bacia do rio Ponte Grande, o que pode sugerir a necessidade de modelagem hidrodinâmica para verificar a hipótese de remanso hidráulico do rio Caveiras para o rio Carahá. Neste caso, a menor duração e maior volume acumulado de chuva em relação ao evento de 2011 sugere ter sido o motivo de o remanso não ter atingido o rio Ponte Grande.

Quanto ao comportamento hidrológico da sub-bacia Ponte Grande para os três eventos, verificou-se o pico no mesmo dia do evento, sendo compatível com os tempos de concentração em horas e o esvaziamento ao longo de vários dias devido ao passo de tempo da simulação ser diário.

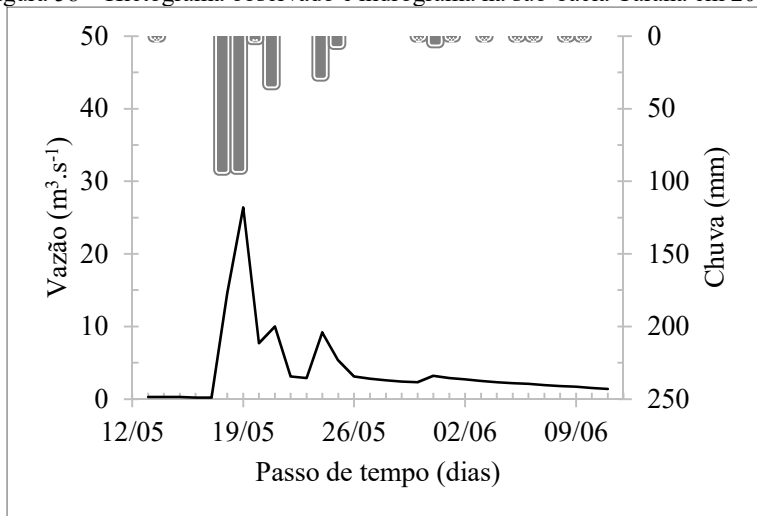
Portanto, o modelo HEC-HMS pôde caracterizar o comportamento hidrológico da sub-bacia Ponte Grande de modo

satisfatório, em vista de que no evento de 2011 não considera a influência do rio Caveiras, porém ao propagar a onda de inundação adequadamente no evento de 2008 em direção ao rio Caveiras mostra-se confiável para utilização dos dados de volume de escoamento superficial gerados.

4.3.2.2 Bacia hidrográfica do rio Carahá

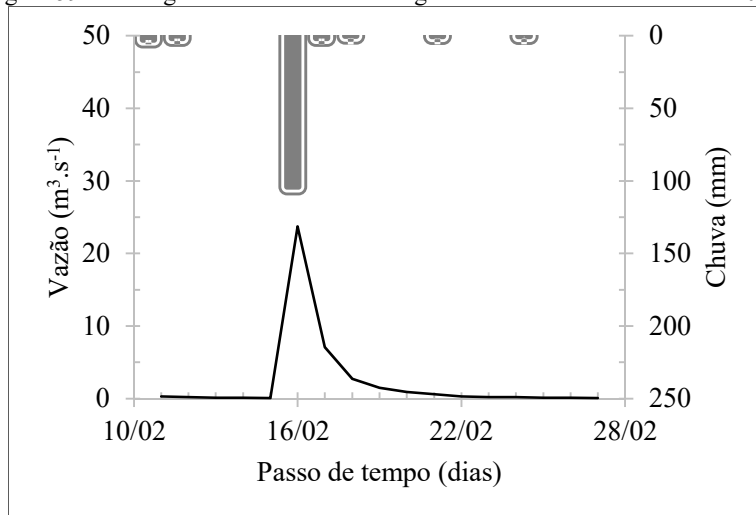
Na sub-bacia Carahá, também foram gerados abaixo os hidrogramas para cada um dos eventos (Figura 58 a 60), com destaque para o fato de esta bacia estar envolvida, de acordo com os mapas de inundação, em todos os desastres por inundação selecionados.

Figura 58 – Hietograma observado e hidrograma na sub-bacia Carahá em 2005.



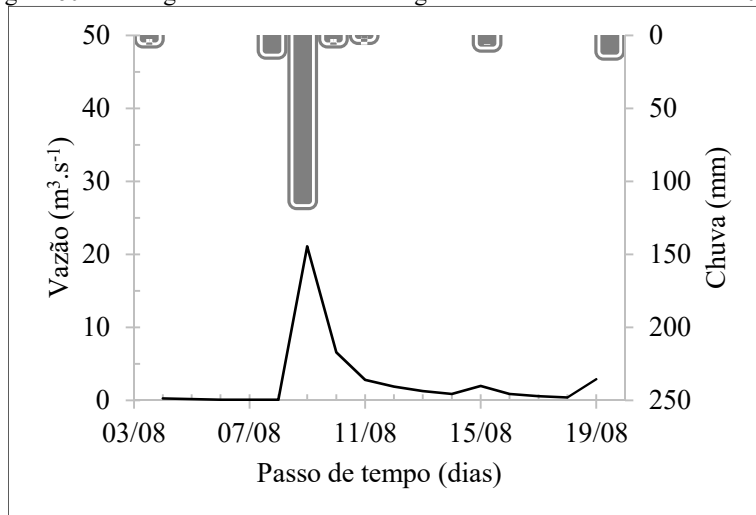
Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 59 – Hietograma observado e hidrograma na sub-bacia Carahá em 2008.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 60 – Hietograma observado e hidrograma na sub-bacia Carahá em 2011.



Fonte: Próprio Autor (2017).

Tabela 22 – Resultados do modelo HEC-HMS para a sub-bacia Carahá e comparação com vazão de pico calibrada do rio Caveiras.

Sub-bacia Carahá				Vazão de
Tempo de Retorno (anos)	Data do pico do Evento	VOLUME de Escoamento Superficial (m ³)	Vazão de pico (m ³ /s)	Pico Caveiras Montante I (m ³ /s)
384	19/05/2005	4,254 x 10 ⁶	26,4	381,6
29	16/02/2008	2,752 x 10 ⁶	23,7	48,5
22	09/08/2011	2,451 x 10 ⁶	21,1	284,1

Fonte: Próprio Autor (2017).

Na sub-bacia Carahá, fica perceptível que os valores de volume e vazão de pico seguem proporcionais à severidade dos eventos. Pode-se destacar o volume gerado no evento de 2005 para o rio Carahá, muito superior ao encontrado no rio Ponte Grande, o que se explica pelo fato de a sub-bacia Carahá ser mais impermeável devido à maior ocupação urbana, expressa pelo parâmetro CN. Quanto aos picos, diferentemente da sub-bacia Ponte Grande, o fato de crescerem proporcionalmente com a severidade do evento também é explicado por meio do parâmetro CN, pelo fato de que os valores específicos para cada calibração da sub-bacia Carahá foram sempre superiores aos da sub-bacia Ponte Grande, independentes do evento.

Quanto ao comportamento hidrológico da sub-bacia Carahá para os três eventos, verificou-se o pico no mesmo dia do evento, sendo compatível com os tempos de concentração em horas e o esvaziamento ao longo de vários dias devido ao passo de tempo da simulação ser diário, assim como descrito para a sub-bacia Ponte Grande.

Assim, o modelo HEC-HMS também pôde caracterizar o comportamento hidrológico da sub-bacia Carahá de modo satisfatório, em vista de que se mostra confiável ao propagar a onda de inundação adequadamente no evento de 2008 em direção ao rio Caveiras, além de esclarecer a severidade dos volumes apresentados em 2005 e 2011 e a consequência da geração desse escoamento superficial no exutório da bacia.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As conclusões que o presente trabalho de pesquisa proporcionou, dividem-se na avaliação dos objetivos propostos, as vantagens e limitações encontradas e as recomendações e sugestões para trabalhos futuros, com base no desempenho do modelo hidrológico HEC-HMS.

O objetivo de investigar por meio da modelagem hidrológica orientada por eventos, os volumes e vazões de pico nas duas principais bacias urbanas da cidade de Lages se cumpriu de forma satisfatória, isto é, completa, gerando valores de volume de $1,93 \times 10^6$ a $4,25 \times 10^6$ m³ e vazões de pico que variam de 16,7 a 26,4 m³/s nos eventos extremos de 2005, 2008 e 2011.

Os métodos de cálculo selecionados no modelo também puderam ser verificados e apresentaram como os parâmetros otimizados influenciaram desde a geração de escoamento superficial nas sub-bacias até a propagação de onda dos volumes produzidos. A constatação foi que o CN, ao influenciar fortemente na estimativa da vazão de pico, junto à constante de recessão, relacionada com a contribuição antecedente aos cursos d'água das bacias, foram os parâmetros que melhor representaram os processos hidrológicos no sistema Caveiras Montante 1. Este segundo objetivo se cumpriu parcialmente, devido a aplicação do SCS-UH. Isto, porque requer normalmente o conhecimento de precipitações com durações inferiores a 24 horas e o tempo de retardo em horas foi aplicado para um intervalo de simulação diário. Tal fator proporcionou mais incertezas nos cálculos.

Tais esclarecimentos puderam auxiliar na avaliação dos mecanismos geradores de inundação e as possíveis hipóteses para o transbordamento dos afluentes urbanos. Quanto aos diferentes comportamentos hidrológicos das sub-bacias inseridas no sistema Caveiras Montante 1, foram expostos hidrogramas simultâneos de seções de controle para o entendimento da ocorrência dos desastres por inundação, ao mesmo tempo durante o evento, para montante da área inundável, local intermediário entre as sub-bacias urbanas e jusante da mesma área inundável. Isso possibilitou a criação de hipóteses complementares aos mecanismos geradores de inundação e permitiu cumprir completamente o terceiro objetivo proposto por este trabalho.

Tais análises permitiram o estabelecimento de vantagens para obter sucesso na modelagem orientada por eventos em sub-bacias sem monitoramento adequado. Os critérios adotados como vantagens ao longo da pesquisa foram a busca pela simplicidade na solução das equações necessárias e a associação do conhecimento teórico, técnico e prático das

áreas das bacias estudadas ao tomar decisões para gerar os hidrogramas calculados.

As principais limitações ou desvantagens na modelagem com o HEC-HMS foram a disponibilidade apenas de dados diários, o que influenciou nos tempos dos hidrogramas calculados, e por fim, a incerteza na propagação dos volumes das sub-bacias em função da hipótese de influência de remanso hidráulico do rio Caveiras sobre as sub-bacias urbanas.

As recomendações e sugestões para trabalhos futuros partem dos resultados da calibração e testes realizados, além das conclusões feitas para cada um dos objetivos propostos. Buscando contribuir com o gerenciamento dos desastres naturais na cidade e auxiliar os órgãos responsáveis na tomada de decisão, o fato de o monitoramento das bacias estudadas estarem sendo implementados e desenvolvidos atualmente, impulsiona ainda mais a demanda por um estudo futuro de modelagem hidrodinâmica das inundações na cidade de Lages para sanar as dúvidas e lacunas deixadas pelo presente trabalho.

De modo geral, é sugerido manter o foco nos hidrogramas calculados neste trabalho a fim de prever cotas de inundação e áreas inundáveis para diversos tipos distintos de eventos extremos, assim como os três analisados. Isto permite dar suporte para o conhecimento dos processos hidrológicos que ocorrem nas áreas que se encontram dentro do denominado sistema Caveiras Montante 1 e enfatizar a transferência de parâmetros entre sub-bacias inseridas num mesmo sistema.

REFERÊNCIAS

- ARNOLD, J.G.; MORIASI, D.N.; GASSMAN, P.W.; ABBASPOUR, K.C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M.W.; KANNAN, N.; JHA, M.K. SWAT: model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**. V. 55, n.4, p. 1491-1508, 2012.
- BARNARD, T. E.; KUCH, A.; GEOFF R. T.; SUDESH, M.; B. C. PHILLIPS. Evolution of an Integrated 1D/2D Modeling Package for Urban Drainage. In: JAMES, W. Contemporary Modeling of Urban Water Systems. **Guelph, on canada: Computational Hydraulics International**, 2007. Cap. 18, p. 343-365.
- BEMFICA, D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto de Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, v.5, n.4, p. 5-16, 2000.
- BEVEN, K.J. **Rainfall Runoff Modelling: The Primer**. 1. ed. Chichester: Wiley, 2001.
- CALÇADA, M.; PORTELA, M; MATOS, J. Análise de Cheias e Delimitação de Zonas Inundáveis em Timor-Leste: Abordagem por Modelação Geográfica. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 7º, 2003, Lisboa. **Anais...** Lisboa: APRH, 2003.
- CAMPOS, J. N.. **Lições em Modelos e Simulação Hidrológica**. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2009. 166 p.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- CARDOSO, C. O.; BERTOL, I.; SOCCOL, O. J.; SAMPAIO, C. A. de P. Generation of Intensity Duration Frequency Curves and Intensity Temporal Variability Pattern of Intense Rainfall for Lages/SC. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 57, n. 2, p. 274-283, March-April 2014.
- CASTRONOVA, M.; GOODALL, J.L. Simulating watersheds using loosely integrated model components: Evaluation of computational

scaling using OpenMI. **Environmental Modelling and Software**, v.39, p. 304-313, 2013.

CHOW, V.T. **Open-channel hydraulics**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1959.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied Hydrology**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia: para Engenharia e Ciências Ambientais**. 1. ed. Porto Alegre, RS: ABRH, 2013.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira dos Recursos Hídricos - RBRH**, v.8, n. 3, p. 27-41, 2003.

CORDEIRO, M. T. A.; RAFAELI NETO, S. L. Análise do comportamento de sistemas urbanos por meio de componentes de sistemas hidrológicos. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 142-155, 2015.

CUNGE, J.A.; HOLLY Jr., F.M.; VERWEY, A. Practical Aspects of Computational River Hydraulics. **Monographs and surveys in water resources engineering - Pitman Advanced Publishing Program**. London, p. 407-415, 1980.

DISKIN, M.H. Research approach to watershed modeling, definition of terms. In: **ARS and SCS watershed modeling workshop**, Tucson, 1970.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2005. 133p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Solos do Estado de Santa Catarina**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n. 46, 2004.

FORD, D.T.; HAMILTON, D. Computer models for water-excess management. **Water resources handbook**, Larry W. Mays ed. New York: McGraw-Hill, 1996.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRH, 2005.

GUL, G.O; HARMANCIOGLU, N.; GUL, A. A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures. **Natural Hazards**, v. 54, n. 2, p. 245–260, 2009.
HAMILL, L. **Bridge Hydraulics**. 1. ed. London: E. & F.N. Spon, 1999.

HALWATURA, D.; NAJJIM, M.M.M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. **Environmental Modelling and Software**, v. 46, p. 155-162, 2013.

KNEBL, M. R.; YANGA, Z. L.; HUTCHISONB, K.; MAIDMENT, D. R. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. **Journal of Environmental Management**, v. 75, p. 325-336, 2004.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; LINO, J.F.; SILVA, R.V. Time of concentration in the UFSC Campus catchment, Florianópolis/SC (Brazil), calculated with morphometric and hydrological methods. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA / REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: IAG, 2006.

KOUTITAS, C. G. **Elements of Computational Hydraulics**. 1. ed. NewYork: Pentech Press, 1983.

KOUTROULIS, A.G.; TSANIS, I.K. A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: case study for the 13–14 January 1994 flood, Giofiros basin, Crete, Greece. **Journal of Hydrology**, v. 385, p. 150–164, 2010.

KOVACS, S.; KISS, A.; SZEKERES, J. Experiences in application of HEC-RAS model under circumstances of flood waves. In: SCHANZE, J.; ZEMAN, E.; MARSALEK, J. (eds.). **Flood Risk Management -**

Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures. Springer, 2006. p. 47–58.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BASE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences.** v.5, p. 89-97, 2005.

KUNDZEWICZ, Z. W. New uncertainty concepts in hydrology and water resources. In: **International workshop on new uncertainty concepts in hydrology and water concepts**, HIS, 1990, Madralin, Poland, 1990.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 154 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology.** 1. ed. Michigan: McGraw-Hill, 1993.

MIGUEZ, M. G. **Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas.** 2001. 410 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 2. ed. Viçosa: UFV, 2003.

MOTA, F. S., BEIRSDORF, M. I. C., GARCEZ, J. R. B. **Zoneamento agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina: normais agroclimáticas.** 1. ed. Pelotas: Instituto de Pesquisa Agropecuária do Sul, 1971.

NASCIMENTO, N.O.; BARBOSA, R.L.A; COSTA, O.V; BAPTISTA, M.B. Relações entre o planejamento urbano e o planejamento dos sistemas de drenagem: Estudo de caso do Ribeirão Areias em Betim, MG. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 20., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2000.

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE – NRCS.
National Engineering Handbook, Part 630-Hydrology. Washington,
DC: U.S. Department of Agriculture, 2004.

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE – NRCS.
**Technical release number 55 (TR-55): Urban hydrology for small
watersheds.** Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, 1986.

NETO, A. R.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. de O.; SILVA, E. R.
Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em
Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira
de Recursos hídricos - RBRH**, v. 20, p. 394-403, abr./jun. 2015.

NETO, A. R.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q.
Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone
areas: municipality of Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos
Hídricos - RBRH**, v.21, n.2, p. 377-390, 2016.

NETO, O. C. L.; MENEZES, O. L. M. P. F. de; TAVARES, P. R. L.
Modelagens experimental, teórica e computacional de escoamento
gradualmente variado em canal retangular. In: ENCONTRO
UNIVERSITÁRIO DA UFC NO CARIRI, 4., 2012, Juazeiro do Norte.
Anais... Juazeiro do Norte: UFC, 2012.

OLEYIBLO, J.O.; LI, Z. Application of HEC-HMS for flood
forecasting in Misai and Wan'na catchments in China. **Water Science
and Engineering**, v.3, p.14-22, 2010.

PILGRIM, D.H.; CORDERY, I. Flood runoff. D.R. In: MAIDMENT
(Org.), **Handbook of hydrology.** New York: McGraw-Hill, 1992.

RAFAELI NETO, S. L. **Um modelo conceitual de sistema de apoio à
decisão espacial para gestão de desastres por inundações.** 2000. 234
f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade
de São Paulo, São Paulo, 2000.

S2ID – SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÕES SOBRE
DESASTRES. **Biblioteca virtual.** Brasília: Ministério da Integração
Nacional, 2016. Documento Digital.

SARHADI, A.; SOLTANI, S.; MODARRES, R. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. **Journal of Hydrology**, n. 458-459, p. 68–86, 2012.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A.M; LOMBARDI NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo – Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, p. 05-18, 2005.

SDS - SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: ENGEMAP, 2013. Documento Digital.

SHAMSUDIN, S.; DAN'AZUMI, S.; RAHMAN, A. A. Uncertainty Analysis of HEC-HMS Model Parameters Using Monte Carlo Simulation. **International Journal of Modelling and Simulation**, v.31, n.4, p. 279-286, 2011.

SHERMAN, L.K. The unit hydrograph method. In: **Physics of the Earth**. 9. ed. New York, 1942.

SMITH, K. **Environmental Hazards Assessing Risk and Reducing Disaster**. 3. ed. London: Routledge 11 New Fetter Lane, 2001.

ŠUSTIĆ, D.; TADIĆ, Z.; TADIĆ, L.; KRŽAK, T. Hydrologic and Hydraulic analysis of less studied watersheds. In: **Conference of the danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management**, 24., Bled. Ljubljana: Slovenian National Committee for IHP UNESCO, 2008.

TELLMAN, B.; SAIERS, J. E.; CRUZ, O. A. R. Quantifying the impacts of land use change on flooding in datapoor watersheds in El Salvador with community-based model calibration. **Regional Environmental Change**, 2015.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. **Revista de Gestão de Água na América Latina - REGA**. Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 59-73, 2004.

TUCCI, C. E. M.; MELLER, A. Regulação das águas pluviais urbanas. **Revista de gestão de Água da América Latina - REGA**, Rio de Janeiro, v. 4. p. 75-89, 2007.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998.

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Flood-runoff analysis, Engineer Manual - EM 1110-2-1417**. Washington: Office of Chief of Engineers, 1994. 214 p.

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual**. Davis: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 1998. 434p.

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydrologic Modeling System HEC-GeoHMS: User Manual**, version 10.1. Davis: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2013. 193p.

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Applications Guide**. Davis: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2015a. 169p.

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Quick Start Guide**, version 4.1. Davis: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2015b. 58p.

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual**. Davis: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2000. 148p.

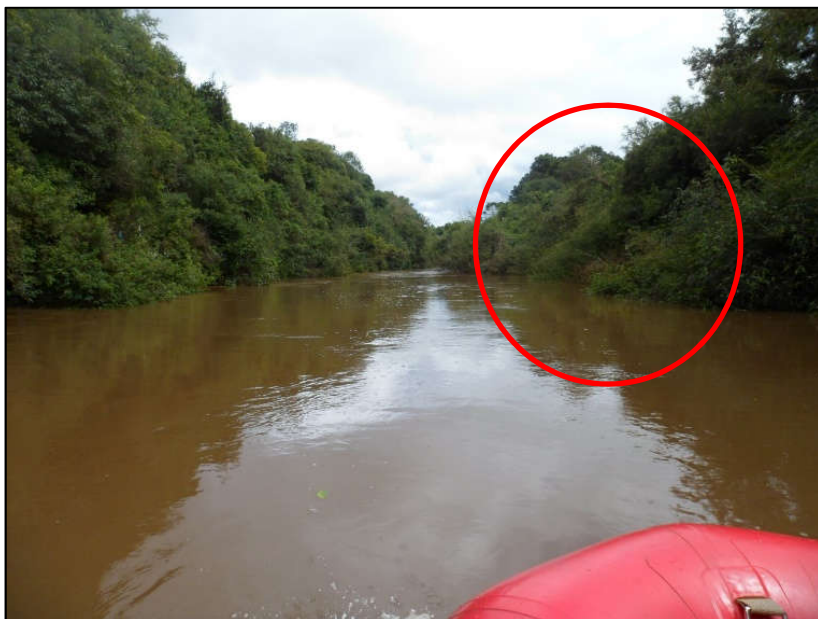
USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User Manual**, version 4.1. Davis: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2015c. 600p.

VISUTIMETEEGORN, S.; LIKITDECHAROTE, K;
VONGVISESSOMJAI, S. The effects of Chao Phraya dam operation on
the upstream flood inundation. In: **International Symposium on
Integrated Water Resources Management**, 3., Bochum: IAHS, 2007.

APÊNDICE A – Rio Caveiras sem precedente de chuva

Fonte: Próprio autor (2016).

APÊNDICE B – Rio Caveiras após evento prolongado de chuva



Fonte: Próprio autor (2016).

APÊNDICE C – Rio Caveiras: Cota da água em relação a copa das árvores sem precedentes de chuva



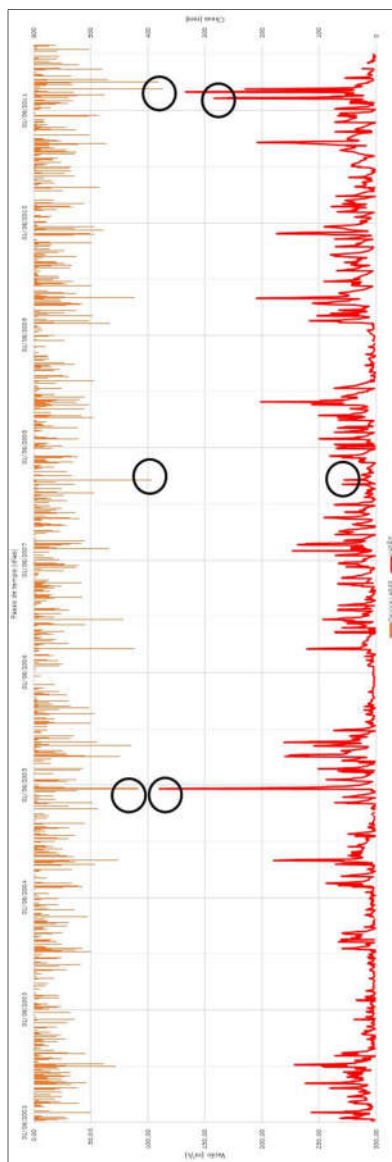
Fonte: Próprio autor (2016).

APÊNDICE D – Rio Caveiras: Cota da água em relação a copa das árvores após evento prolongado de chuva

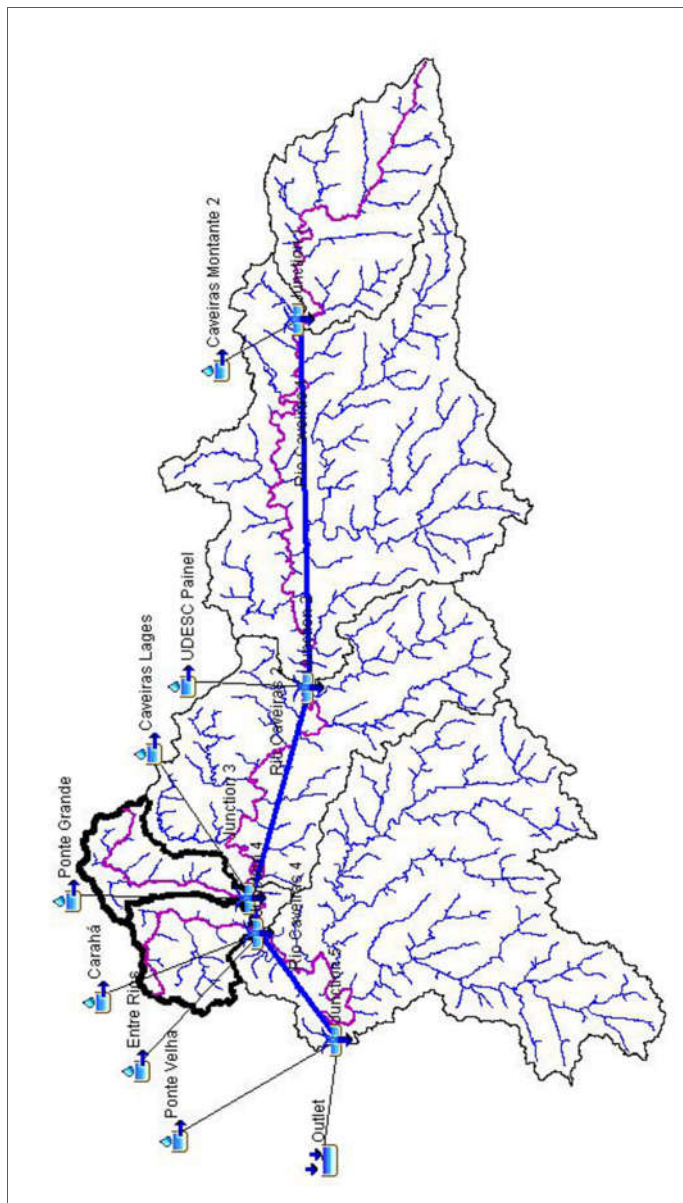


Fonte: Próprio autor (2016).

APÊNDICE E – Série histórica observada na estação fluviométrica Ponte Velha

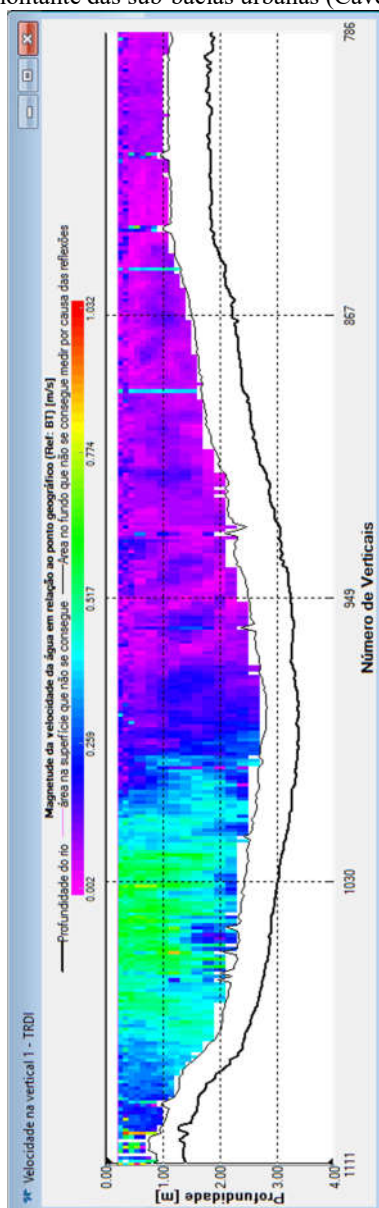


APÊNDICE F – Esquema conceitual: Sistema Caveiras Montante 1

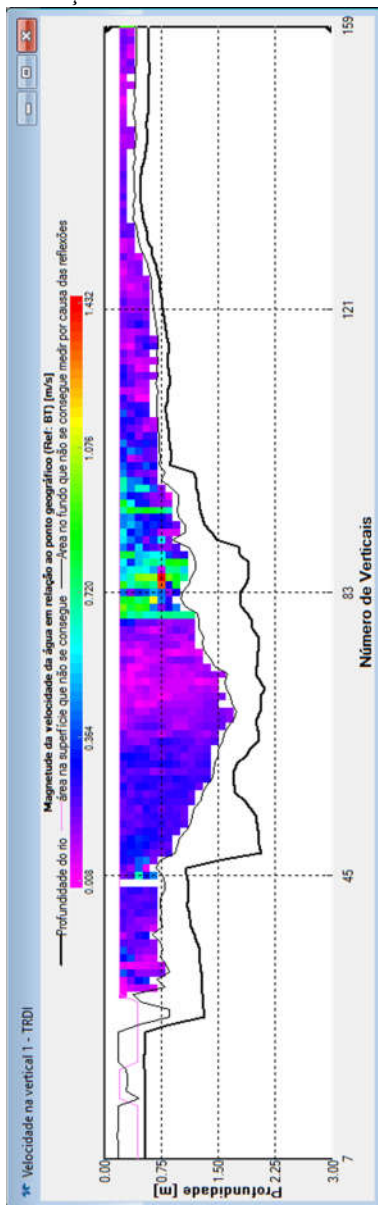


APÊNDICE G – Perfis batimétricos experimentais das seções

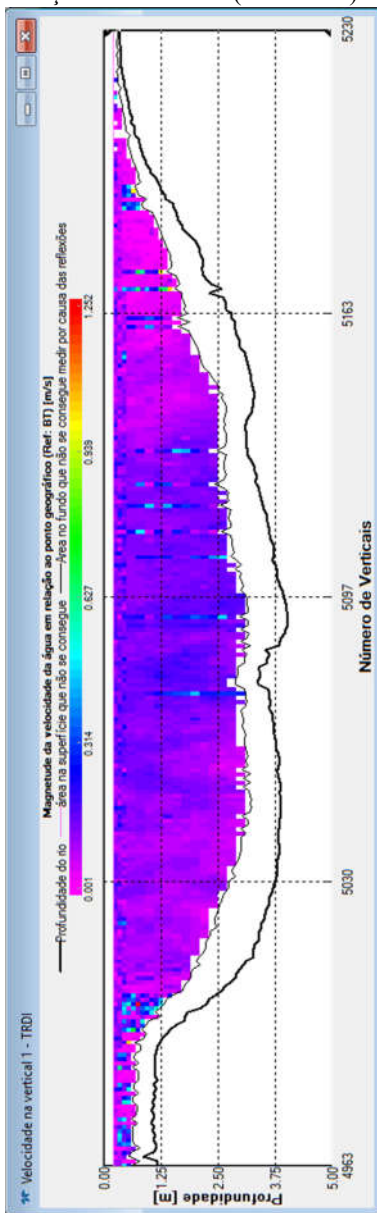
Seção de montante das sub-bacias urbanas (Caveiras Lages).



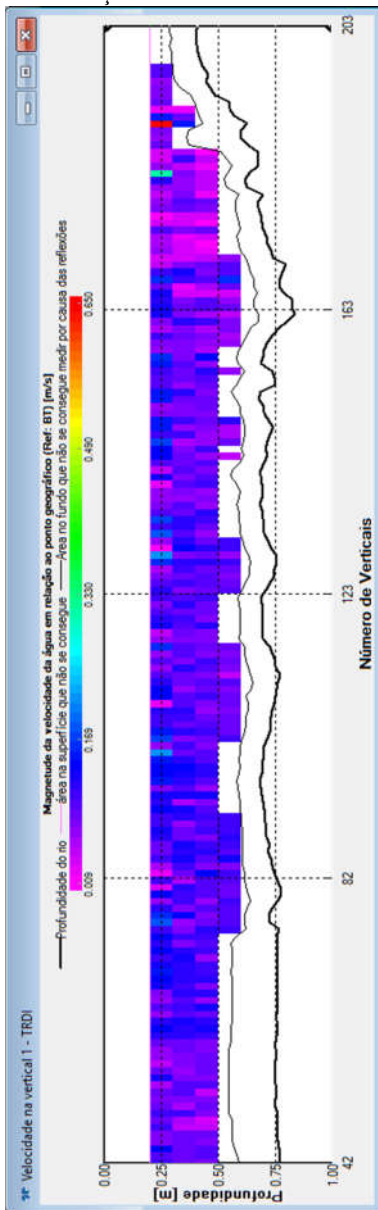
Seção exutório Ponte Grande.



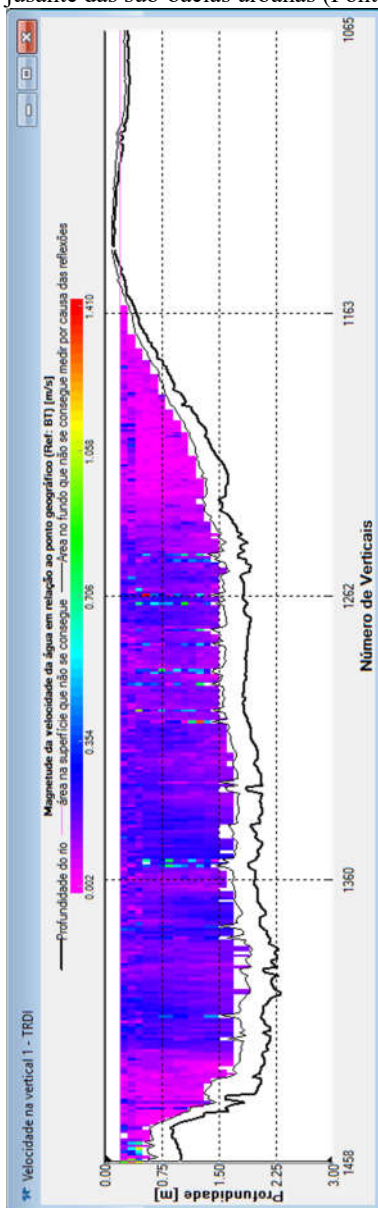
Seção intermediária (Entre Rios).





Seção exutório Carahá.



Seção a jusante das sub-bacias urbanas (Ponte Velha).



ANEXO A – Avaliação de Danos (AVADAN) do evento de 2005

SISTEMA NACIONAL DE DEFESA CIVIL - SINDEC				
		AVALIAÇÃO DE DANOS		
1 - Tipificação Código Denominação NE.HIG 12.301 Enchentes ou Inundações Graduais			2 - Data de Ocorrência Dia Mês Ano Horário 18 05 05 01:00	
3 - Localização UF SC Município Lages			PROTOCOLO Nº. 8025 DATA 06/06/05	
4 - Área Afetada Tipo de Ocupação Não existe/ Não afetada Urbana Rural Urbana e Rural				
Residencial X				
Comercial X				
Industrial X				
Agrícola X				
Pecuária X				
Extrativismo Vegetal X				
Reserva Florestal ou APA X				
Mineração X				
Turismo e outras X				
Descrição da Área Afetada Foram afetados os seguintes bairros na Zona Urbana : Várzea, Caça e Tiro, Popular, Caravaggio, Ferrovia, Vila Nova, Habitação, Universitário, Bom Jesus, Santa Maria, Passo Fundo, São Vicente, Santo Antônio, São Miguel, Santa Catarina. E na Zona Rural : Morrinhos, Santa Terezinha do Salto Caveiras, Escurinho, Macacos, Raposo e Vigia/Bodegão.				
5 - Causas do Desastre - Descrição do Evento e suas Características Enchentes com alagamentos e inundações devido as fortes chuvas ocorridas nos dias 18 e 19 de maio do corrente ano, o que ocasionou um grande volume de água despejados nos rios que contornam o município.				
Secretaria de Defesa Civil - SEDEC Esplanada dos Ministérios - Bloco "E" - 6º Andar - Brasília/DF - 70067-901			Fone - (61) 223-4717 Fax-(61) 226-7588	
Departamento Estadual de Defesa Civil Av. Ivo Silveira, 2.320, Capoeiras - CEP 88.085-000 - Florianópolis - SC			Fone: (0xx48) 271- 0916 / Fax: (0xx48) 271- 0919 E-mail - defesacivilsc@ssp.sc.gov.br	
Centro de Operações de Defesa Civil Av. Ivo Silveira, 2.320, Capoeiras - CEP 88.085-000 - Florianópolis - SC			Fone: (0xx48) 271- 0916 / Fax: (0xx48) 271- 0919 E-mail - codoc@defesacivil.sc.gov.br	

6 - Danos Humanos Número de Pessoas	0 a 14 anos	15 a 64 anos	Acima de 65 anos	Gestantes	Total
Desalojadas	2.610	2.220	280	30	5.140
Desabrigadas	52	20	8	-	60
Deslocadas	-	-	-	-	-
Desaparecidas	-	-	-	-	-
Levemente Feridas	-	-	-	-	-
Gravemente Feridas	-	-	-	-	-
Eufernas	-	-	-	-	-
Mortas	-	-	-	-	-
Afetadas	2.642	2.240	288	30	5.200

7 - Danos Materiais Edificações	Danificadas		Destruídas		Total Mil R\$
	Quantidade	Mil R\$	Quantidade	Mil R\$	
Residenciais Populares	186	362	42	191	553
Residenciais - Outras	972	1.458	-	-	1.458
Públicas de Saúde	-	-	-	-	-
Públicas de Ensino	-	-	-	-	-
Infra-Estrutura Pública					
Obras de Arte (pontes)	06	34.874	01	25.075	59.949
(passarela)	90m	13.5	-	-	13.5
Estradas (Km)	10.000	400	-	-	400
Pavimentação de Vias Urbanas (Mil m ²)	3.500	736	-	-	736
Outras (calçadas)	60m ²	3.7	-	-	3.7
Comunitárias	-	-	-	-	-
Particulares de Saúde	-	-	-	-	-
Particulares de Ensino	-	-	-	-	-
Rurais	-	-	-	-	-
Industriais	-	-	-	-	-
Comerciais	-	-	-	-	-

8 - Danos Ambientais Recursos Naturais	Intensidade do Dano					Valor Mil R\$
	Sem Danos	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	
Água						
Esgotos Sanitários	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Efluentes Industriais	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Resíduos Químicos	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Outros	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Solo						
Erosão	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	X	<input type="radio"/>	296.360
Deslizamento	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Contaminação	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Outros (Assoreamento do rio/ Enleivamento de encosta)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	X	<input type="radio"/>	59.274
Ar						
Gases Tóxicos	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Partículas em Suspensão	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Radioatividade	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Outros	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Flora						
Desmatamento	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Queimada	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Outros	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Fauna						
Caça Predatória	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-
Outros	X	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-

9 - Prejuízos Econômicos Setores da Economia	Quantidade		Valor Mil R\$
	Produção		
Agricultura			
Grãos/cereais/leguminosas	-	t	-
Fruticultura	-	t	-
Horticultura	-	t	-
Silvicultura/Extratvismo	-	t	-
Comercial	-	t	-
Outras	-	t	-
Pecuária			
Grande porte	-	unid	-
Pequeno porte	-	unid	-
Avicultura	-	unid	-
Piscicultura	-	mil unid	-
Outros	-	unid	-
Indústria			
Extração Mineral	-	t	-
Transformação	-	unid	-
Construção	-	unid	-
Outros	-	unid	-
Serviços			
	-	prest. de serviço	-



Instituição Financeira	-	unid	-
Outros	-	unid	-
Descrição dos Prejuízos Económicos			
10 - Prejuízos Sociais			
Serviços Essenciais			
		Quantidade	Valor
			Mil R\$
Abastecimento d'Água			
Rede de Distribuição	-	m	-
Estação de Tratamento (ETA)	-	unid	-
Manancial	-	m ³	-
			Mil R\$
Energia Elétrica			
Rede de Distribuição	-	m	-
Consumidor sem energia	-	consumidor	-
			Mil R\$
Transporte			
Vias	-	km	-
Terminais	-	unid	-
Meios	-	unid	-
			Mil R\$
Comunicações			
Rede de Comunicação	-	km	-
Estação Retransmissora	-	unid	-
			Mil R\$
Esgoto			
Rede Coletora	250	m	12,5
Estação de Tratamento (ETE)	-	unid	-
			Mil R\$
Gás			
Geração	-	m ³	-
Distribuição	-	m ³	-
			Mil R\$
Lixo			
Coleta	-	t	-
Tratamento	-	t	-
			Mil R\$
Saúde			
Assistência Médica	-	p.dia	-
Prevenção	-	p.dia	-
			Mil R\$
Educação			
Alunos sem dia de aula	-	aluno/dap	-
			Mil R\$
Alimentos Básicos			
Estabelecimentos Armazenadores	-	t	-
Estabelecimentos comerciais	-	estabelec.	-
Descrição dos Prejuízos Sociais:			

11 - Informações sobre o Município		Ano Anterior: 2004	
Ano Atual: 2005			
População (hab):	Orçamento (Mil R\$):	PIB (Mil R\$):	Arrecadação (Mil R\$):
162.060	143.000	1.432.314	126.745

12 - Avaliação Conclusiva sobre a Intensidade do Desastre (Ponderação)				
Critérios Preponderantes				
Intensidade dos Danos	Pouco Importante	Médio ou Significativo	Importante	Muito Importante
Humanos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Materiais	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ambientais	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vulto dos Prejuízos	Pouco Importante	Médio ou Significativo	Importante	Muito Importante
Econômicos	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sociais	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Necessidade de Recursos Suplementares	Pouco Vultosos	Mediamente Vultosos ou Significativos	Vultosos porém Disponíveis	Muito Vultosos e Não Disponíveis no SINDEC
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Critérios Agravantes				
Importância dos Desastres Secundários	Pouco Importante	Médio ou Significativo	Importante	Muito Importante
	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Despreparo da Defesa Civil Local	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grau de Vulnerabilidade do Cenário	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grau de Vulnerabilidade da Comunidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Padrão Evolutivo do Desastre	Gradual e Previsível	Gradual e Imprevisível	Súbito e Previsível	Súbito e Imprevisível
	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tendência para agravamento	Não			Sim
	<input checked="" type="radio"/>			<input type="radio"/>
Conclusão				
Nível de Intensidade do Desastre	I	II	III	IV
Porte do Desastre	Pequeno ou Acidente	Médio	Grande	Muito Grande
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

13 - Instituição Informante		Responsável			
Nome da Instituição Prefeitura do Município de Lages Comissão Municipal de Defesa Civil - COMIDEC		João Raimundo Colombo Celso Antônio Calcegratto			
Cargo Prefeito Municipal	Assinatura <i>João Raimundo Colombo</i> João Raimundo Colombo Prefeito	Telefone 0xx49 221-1003	Dia 23	Mês 05	Ano 2005
14 - Instituições Informadas		Informada			
Coordenadoria Estadual de Defesa Civil		<input checked="" type="checkbox"/>			
Coordenadoria Regional de Defesa Civil		<input type="checkbox"/>			
15 - Informações Complementares		Taxa de conversão para o Dólar Americano: 2,42			
Moeda utilizada no preenchimento: Real					

ANEXO B – Avaliação de Danos (AVADAN) do evento de 2008

PROTOCOLO DEDC 1-15298 Em: 13.1.8 108						
SISTEMA NACIONAL DE DEFESA CIVIL-SINDEC						
		AVALIAÇÃO DE DANOS				
1 - Tipificação			2- Data de Ocorrência			
Código	Denominação		Dia	Mês	Ano	Horário
NE.HEX	12.302	Enxurradas ou inundações bruscas	15	02	08	20:00h
3- Localização						
UF: SC		Município: Lages				
4 – Área Afetada						
Tipo de Ocupação	Não existe/ Não afetada	Urbana	Rural	Urbana e Rural		
Residencial	o	x	o	o		
Comercial	x	o	o	o		
Industrial	x	o	o	o		
Agrícola	x	o	o	o		
Pecuária	x	o	o	o		
Extrativismo Vegetal	x	o	o	o		
Reserva Florestal ou APA	x	o	o	o		
Mineração	x	o	o	o		
Turismo e outras	o	x	o	o		
Descrição da Área Afetada: Parte da área Urbana com seus Bairros e respectivas Ruas: Bairro Universitário(Ruas: Irineu Correa, Sebastião Ramos Schmidt, João Dias Brascher), Bairro Caça e tiro(Ruas: Cirilo Vieira Ramos) Bairro Habitação(Ruas: Guabrobeta, Erva Mate, Cambará), Bairro Beatriz(Ruas: Luiz Floriani Sobrinho, Ignácio Antunes de Athayde, Euclides Cardoso), Bairro Penha(Ruas: Manoel Inácio Martins), Bairro Passo Fundo(Ruas Dejalne Joaquim Alves, Sebastião de Camargo, Agostinho Faria Neto, Coronel Sotero Rocha, Altamiro Silva), Bairro Santo Antônio(Ruas: Maria Arlene da Luz, Luiz Canani, Maria Ollia Amaral), Bairro Pisaní(Ruas: Alziro Alves da Silva, Iracema Alves Floriani), Bairro Sagrado Coração de Jesus(Ruas: Lourenço Theodoro Waltrick, Coronel Lica Ramos, Afonso Pena, Nilo Peçanha, Humberto de Campos, Cassemiro de Abreu, João Ribeiro Branco, Antônio Edu Vieira, Cel. Zéca Athanásio), Bairro São Cristóvão(Ruas: Ceará, Rio Grande do Norte, Pará, Piauí e Avenida(Avenida Brasil, Avenida Brasília), Bairro Várzea(Avenida e Ruas, Avenida Ponte Grande, Nelson de Castro Brascher, Pompeu Sabaline, Benjamin Adnes, Francisco San Tiago Dantas Cláudio Manoel da Costa), Bairro Marizal(Ruas: Nazaré, Jerusalém), Bairro São Miguel(Ruas: João Francisco Veloso, Catulo da Paixão Cearense, Avaribóia, Roberto Carbonera, Frei Caneca, Ilapóá, Bairro Morro Grande(Ruas: Frel Silva Nelyva),Bairro São Sebastião(Ruas: Ponte Grande), Bairro Centro(Ruas: Lydio Reis, Emiliano Ramos, Otacílio de Oliveira Couto,Manoel Augusto Neves, Soroptimista, Dr.Caetano Júnior, Carolina Batalha Ribeiro, Mário Augusto de Souza e Av. Belisário Ramos), Bairro Conta Dinheiro(Ruas : Marechal Rondon, Hercílio Granzotto, Bairro São Francisco(Ruas: Alexandre Levy), Bairro São Paulo(Ruas: Assis Republicano), Bairro Vila Maria(Ruas: Visconde de Inhaúma), Bairro São Luiz,(Ruas: Frel Hermínio, Maria Ollia Amaral), Bairro Araucária(Ruas: Alcides Pereira de Andrade), Bairro Brusque(Ruas: Professor Teobaldo Delving, Marluce Aparecida Sutil dos Santos Bairro Copacabana(Ruas: Mateus Junqueira, Marciano Antunes), Bairro Santa Helena(Ruas: Rua Porto Alegre), Bairro Ferrovia(Ruas : (Marechal Castelo Branco, Gomes Carneiro, Major Bibiano Rodrigues Lima) 						
Conforme mapa com as áreas afetadas em anexo.						

5 - Causas do Desastre – Descrição do Evento, Enxurrada, caracterizada, por chuva intensa e concentrada, ocorrida no dia 15 de fevereiro, aproximadamente das 20h às 22h, registrado 104mm de chuva, acima da média histórica registrada para o mês de fevereiro que é de 149mm. Com o transbordamento do Rio Carahá. Desastre súbito e de evolução aguda.
O município não possui alarmes ou controles ou registros das alterações, em metros das calhas do Rio Carahá.

6 - Danos Humanos Número de Pessoas	0 a 14 anos	15 a 64 anos	Acima de 65 anos	Gestantes	Total
Desalojadas	263	436	23	4	726
Desabrigadas	----	----	----	----	----
Deslocadas	----	----	----	----	----
Desaparecidas	----	----	----	----	----
Levemente Feridas	----	----	----	----	----
Gravemente Feridas	----	----	----	----	----
Enfermas	----	----	----	----	----
Mortas	----	----	----	----	----
Afetadas	1052	1844	92	16	1940

Considera-se Pessoas afetadas, todas as pessoas que de alguma forma tiveram suas rotinas de vidas alteradas com o incidente pelos danos materiais, ambientais, econômicos, ou seja recebendo vizinhos em casa, fornecendo alimentos, roupas e o estado psicológico abalados.

7 - Danos Materiais Edificações	Danificadas		Destruídas		Total Mil R\$
	Quantidade	Mil R\$	Quantidade	Mil R\$	
Residenciais Populares	193	----	----	----	154
Residenciais - Outras	----	----	----	----	----
Públicas de Saúde	----	----	----	----	----
Públicas de Ensino	*3	----	----	----	33
Infra-Estrutura Pública	----	----	----	----	----
Obras de Arte	----	----	----	----	----
Estradas (Km)	25	----	----	----	500
Pavimentação de Vias	----	----	----	----	----
Urbanas (Mil m ²)	----	----	----	----	----
Outras	----	----	----	----	----
Comunitárias	----	----	----	----	----

Particulares de Saúde	----	----	----	----	----
Particulares de Ensino	----	----	----	----	----
Rurais	----	----	----	----	----
Industriais	----	----	----	----	----
Comerciais	----	----	----	----	----

* - Depósito da Secretaria de Educação, E.M.E.B.(Anjo da Guarda), C.E.I.M (Iracy S. Steink).

8 - Danos Ambientais	Intensidade do Dano					Valor Mil R\$
Recursos Naturais	Sem Danos	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	
Água						----
Esgotos Sanitários	X	o	o	o	o	----
Efluentes Industriais	X	o	o	o	o	----
Resíduos Químicos	X	o	o	o	o	----
Outros	X	o	o	o	o	----
Solo						----
Erosão	o	X	o	o	o	35
Deslizamento	o	X	o	o	o	45
Contaminação	X	o	o	o	o	----
Outros	X	o	o	o	o	----
Ar						----
Gases Tóxicos	X	o	o	o	o	----
Partículas em suspensão	X	o	o	o	o	----
Radioatividade	X	o	o	o	o	----
Outros	X	o	o	o	o	----
Flora						----
Desmatamento	X	o	o	o	o	----
Queimada	X	o	o	o	o	----
Outros	X	o	o	o	o	----
Fauna						----
Caça Predatória	X	o	o	o	o	----
Outros	X	o	o	o	o	----

9 - Prejuízos Econômicos	Quantidade		Valor
Setores da Economia	produção		Mil R\$
Agricultura			
Grãos/cereais/leguminosas	----	T	----
Fruticultura	----	T	----
Horticultura	----	T	----
Silvicultura/Extratvismo	----	T	----
Comercial	----	T	----
Outras	----	T	----
Pecuária			
Grande porte	----	Unid	----

Pequeno porte	----	Unid	----
Avicultura	----	Unid	----
Piscicultura	----	mil unid	----
Outros	----	Unid	----
Indústria	produção		Mil R\$
Extração Mineral	----	T	----
Transformação	----	Unid	----
Construção	----	Unid	----
Outros	----	Unid	----
Serviços	Prest. de Serviço		Mil R\$
Comércio	----	Unid	----
Instituição Financeira	----	Unid	----
Outros	----	Unid	----
Descrição dos Prejuízos Econômicos			

10 - Prejuízos Sociais			
Serviços Essenciais		Quantidade	Valor
			Mil R\$
Abastecimento d'Água			
Rede de Distribuição	----	m	----
Estação de Tratamento (ETA)	----	unid	----
Maneiacial	----	m ³	----
			Mil R\$
Energia Elétrica			
Rede de Distribuição	----	m	----
Consumidor sem energia	----	consumidor	----
			Mil R\$
Transporte			
Vias	----	km	----
Terminais	----	unid	----
Meios	----	unid	----
			Mil R\$
Comunicações			
Rede de Comunicação	----	km	----
Estação Retransmissora	----	unid	----
			Mil R\$
Esgoto			
Rede Coletora	4.300	m	250
Estação de Tratamento (ETE)	----	unid	----
			Mil R\$
Gás			
Geração	----	m ³	----
Distribuição	----	m ³	----
			Mil R\$
Lixo			
Coleta	----	t	----
Tratamento	----	t	----
			Mil R\$
Saúde			
Assistência Médica	----	p.dia	----
Prevenção	----	p.dia	----
			Mil R\$
Educação			
Alunos sem dia de aula	----	aluno/dap	----

Alimentos Básicos	---	Mil R\$
Estabelecimentos armazenadores	---	---
Estabelecimentos comerciais	---	---

estabelec.

Descrição dos Prejuízos Sociais
Danos Causados na rede coletora de esgoto (4.300m de tubulações) prejudicando os serviços essenciais de esgoto nos bairros: São Cristóvão; Passo Fundo; Sagrado Coração de Jesus; São Miguel e São Sebastião Av. Belisário Ramos, nos dias 15 e 16 de fevereiro de 2008.



11 - Informações sobre o Município		Ano Anterior	
Ano Atual	Orçamento (Mil R\$):	PIB (Mil R\$):	Arrecadação (Mil R\$):
População (hab): 161.583	189.000	1.794.000	182.000

12 - Avaliação Conclusiva sobre a Intensidade do Desastre (Ponderação): Trata-se de um desastre				
Critérios Preponderantes	Pouco Importante	Médio ou Significativo	Importante	Muito Importante
Intensidade dos Danos				
Humanos	X	o	o	o
Materiais	o	X	o	o
Ambientais	X	o	o	o
Vulto dos Prejuízos	Pouco Importante	Médio ou Significativo	Importante	Muito Importante
Econômicos	X	o	o	o
Sociais	o	X	o	o
Necessidade de Recursos Suplementares	Pouco Vultosos	Mediamente Vultosos ou Significativos	Vultosos porém Disponíveis	Muito Vultosos e Não Disponíveis no SINDEC
	o	X	o	o
Critérios Agravantes	Pouco Importante	Médio ou Significativo	Importante	Muito Importante
Importância dos Desastres Secundários	X	o	o	o
Despreparo da Defesa Civil Local	o	o	X	o
Grau de Vulnerabilidade do Cenário	o	o	X	o
Grau de Vulnerabilidade da Comunidade	o	X	o	o
Padrão Evolutivo do Desastre	Gradual e Previsível	Gradual e Imprevisível	Súbito e Previsível	Súbito e Imprevisível
	o	o	X	o
Tendência para agravamento	Não			Sim
	X			o
Conclusão				
Nível de Intensidade do Desastre	I	X II	III	IV
Porte do Desastre	Pequeno ou Acidente	Médio	Grande	Muito Grande

Conforme assinalado nos campos anteriores, as atividades da defesa civil, devido a urgência e o despreparo, para o atendimento imediato das vítimas, ocasionaram na falta de uma ampla seqüência de fotos de todas as ocorrências atendidas, bem como alguns documentos perdidos.

13 - Instituição Informante Nome da Instituição		Responsável			
CONDEC – Comissão da Defesa Civil		Marli Barrentin Nacif			
Cargo	Assinatura 	Telefone	Dia	Mês	Ano
Coordenador		49 3221-1000	16	02	2008
14 - Instituições Informadas		Informada			
Coordenadoria Estadual de Defesa Civil		x			
Coordenadoria Regional de Defesa Civil		x			
15 - Informações Complementares					
Moeda utilizada no preenchimento: Reals		Taxa de conversão para o Dólar Americano: 1,76			

ANEXO C – Avaliação de Danos (AVADAN) do evento de 2011

SISTEMA NACIONAL DE DEFESA CIVIL – SINDEC				
		AVALIAÇÃO DE DANOS		
				
1 - Tipificação			2- Data de Ocorrência	
Código	Denominação		Dia	Mês
NE.EVD	12.101	TEMPESTADE	09	08
			2011	05:30
3- Localização				
UF	SC	Município LAGES		
4 – Área Afetada				
Tipo de Ocupação	Não existe/ Não afetada	Urbana	Rural	Urbana e Rural
Residencial	-	-	-	X
Comercial	X	-	-	-
Industrial	X	-	-	-
Agrícola	X	-	-	-
Pecuária	X	-	-	-
Extrativismo Vegetal	X	-	-	-
Reserva Florestal ou APA	X	-	-	-
Mineração	X	-	-	-
Turismo e outras	X	-	-	-
Descrição da Área Afetada				
Parte da área urbana e rural do município.				
5 - Causas do Desastre - Descrição do Evento e suas Características				
Temporal caracterizado pela ocorrência de Vendaval da madrugada do dia 08/08/2011 e nas fortes chuvas dos dias 08 e 09/08/2011, tendo como consequência alagamento, enxurrada e enchente em parte da cidade, houve a Decretação de Situação de Emergência no dia 09/09/2011.				
Secretaria de Defesa Civil – SEDEC Espaço do Ministério - Bloco "E" - 6º Andar - Brasília/DF - 70067-901			Fone - (61) 223-4717 Fax-(61) 226-7588	
Departamento Estadual de Defesa Civil Av. Ivo Silveira, 2.320, Capociras - CEP 88.085-001 - Florianópolis - SC			Fone: (0xx48) 4009-9816 / Fax: (0xx48) 4009-9816 E-mail - dedesce@ssp.sc.gov.br	
Centro de Operações de Defesa Civil Av. Ivo Silveira, 2.320, Capociras - CEP 88.085-001 - Florianópolis - SC			Fone: (0xx48) 3244-0600 / Fax: (0xx48) 4009-9816 E-mail - dedecodec@ssp.sc.gov.br	

6 - Danos Humanos Número de Pessoas	0 a 14 anos	15 a 64 anos	Acima de 65 anos	Gestantes	Total
					Fls
Desalojadas	323	229	6	3	561
Desabrigadas	37	20	2	1	60
Deslocadas	-	-	-	-	-
Desaparecidas	-	-	-	-	-
Levemente Feridas	-	-	-	-	-
Gravemente Feridas	-	-	-	-	-
Enfermas	-	-	-	-	-
Mortas	-	1	-	-	1
Afetadas	462	635	30	3	1130



7 - Danos Materiais Edificações	Danificadas		Destruídas		Total Mil R\$
	Quantidade	Mil R\$	Quantidade	Mil R\$	
Residenciais Populares	287	14,350	10	250,000	264,350
Residenciais - Outras	-	-	-	-	-
Públicas de Saúde	-	-	-	-	-
Públicas de Ensino	11	1,505	-	-	1,505
Infra-Estrutura Pública					
Obras de Arte	15	1062,720	1	20,000	1082,720
Estradas (Km)	56,60	378,400	-	-	378,400
Pavimentação de Vias Urbanas (Mil m ²)	-	-	-	-	-
Outras	29	23,720	-	-	23,720
Comunitárias	-	-	-	-	-
Particulares de Saúde	-	-	-	-	-
Particulares de Ensino	-	-	-	-	-
Rurais	-	-	-	-	-
Industriais	-	-	-	-	-
Comerciais	-	-	-	-	-

8 - Danos Ambientais		Intensidade do Dano					Valor
Recursos Naturais							Mil R\$
Água	Sem Danos	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	-	
Esgotos Sanitários	X	-	-	-	-	-	
Efluentes Industriais	X	-	-	-	-	-	
Resíduos Químicos	X	-	-	-	-	-	
Outros	X	-	-	-	-	-	
Solo	Sem Danos	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	-	
Erosão	-	X	-	-	-	60,000	
Deslizamento	X	-	-	-	-	-	
Contaminação	X	-	-	-	-	-	
Outros	X	-	-	-	-	-	
Ar	Sem Danos	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	-	
Gases Tóxicos	X	-	-	-	-	-	
Partículas em Suspensão	X	-	-	-	-	-	
Radioatividade	X	-	-	-	-	-	
Outros	X	-	-	-	-	-	
Flora	Sem Danos	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	-	
Desmatamento	X	-	-	-	-	-	
Queimada	X	-	-	-	-	-	
Outros	X	-	-	-	-	-	
Fauna	Sem Danos	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	-	
Caça Predatória	X	-	-	-	-	-	
Outros	X	-	-	-	-	-	

DEFESA CIVIL
Fls. 7
A

9 - Prejuízos Econômicos		Quantidade		Valor
Setores da Economia				Mil R\$
Agricultura		produção		
Grãos/cereais/leguminosas	-	T	-	-
Fruticultura	-	T	-	-
Horticultura	-	T	-	-
Silvicultura/Extrativismo	-	T	-	-
Comercial	-	T	-	-
Outros	-	T	-	-
Pecuária		cabeças		Mil R\$
Grande porte	-	Unid	-	-
Pequeno porte	-	Unid	-	-
Avicultura	-	Unid	-	-
Piscicultura	-	mil unid	-	-
Outros	-	Unid	-	-
Indústria		produção		Mil R\$
Extração Mineral	-	T	-	-
Transformação	-	Unid	-	-
Construção	-	Unid	-	-
Outros	-	Unid	-	-
Serviços		prest. de serviço		Mil R\$
Comércio	-	Unid	-	-
Instituição Financeira	-	Unid	-	-
Outros	-	Unid	-	-

9

Descrição dos Prejuízos Econômicos:

**10 - Prejuízos Sociais****Serviços Essenciais**

	Quantidade		Valor
Abastecimento d' Água			Mil R\$
Rede de Distribuição	-	M	-
Estação de Tratamento (ETA)	1	Unid	5,000
Manancial	-	m ³	-

Energia Elétrica

			Mil R\$
Rede de Distribuição	200.000	M	50,000
Consumidor sem energia	11267	consumidor	24,276

Transporte

			Mil R\$
Vias	-	Km	-
Terminais	-	Unid	-
Meios	-	Unid	-

Comunicações

			Mil R\$
Rede de Comunicação	-	Km	-
Estação Retransmissora	-	Unid	-

Esgoto

			Mil R\$
Rede Coletora	-	M	-
Estação de Tratamento (ETE)	-	Unid	-

Gás

			Mil R\$
Geração	-	m ³	-
Distribuição	-	m ³	-

Lixo

			Mil R\$
Coleta	-	T	-
Tratamento	-	T	-

Saúde

			Mil R\$
Assistência Médica	-	p.dia	-
Prevenção	-	p.dia	-

Educação

			Mil R\$
Alunos sem dia de aula	628/2	aluno/dap	23,864

Alimentos Básicos

			Mil R\$
Estabelecimentos armazenadores	-	T	-
Estabelecimentos comerciais	-	estabelec.	-


Descrição dos Prejuízos Sociais:

Energia elétrica: danos na rede de distribuição com rompimento da fiação, queda de postes, etc, causando a suspensão do abastecimento de energia elétrica nos dias 08 e 09 de agosto em parte da área urbana e rural do município.

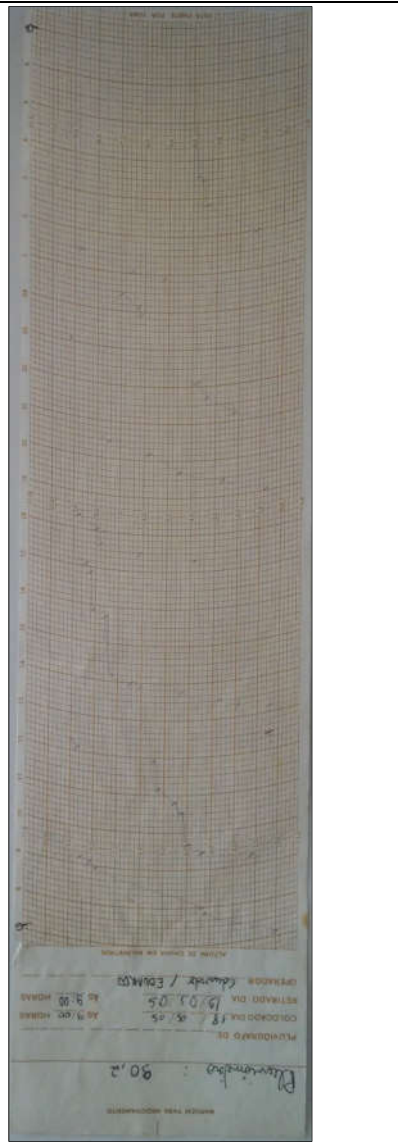
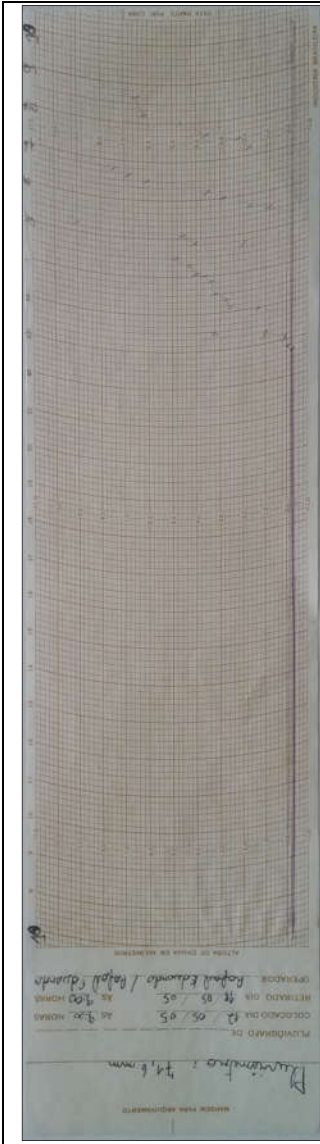
Educação: danos materiais na estrutura das escolas havendo suspensão das aulas e dificuldade de acesso até a escola.

Transporte: algumas vias devido a cheia foram fechadas impossibilitando o acesso de veículos e pessoas.

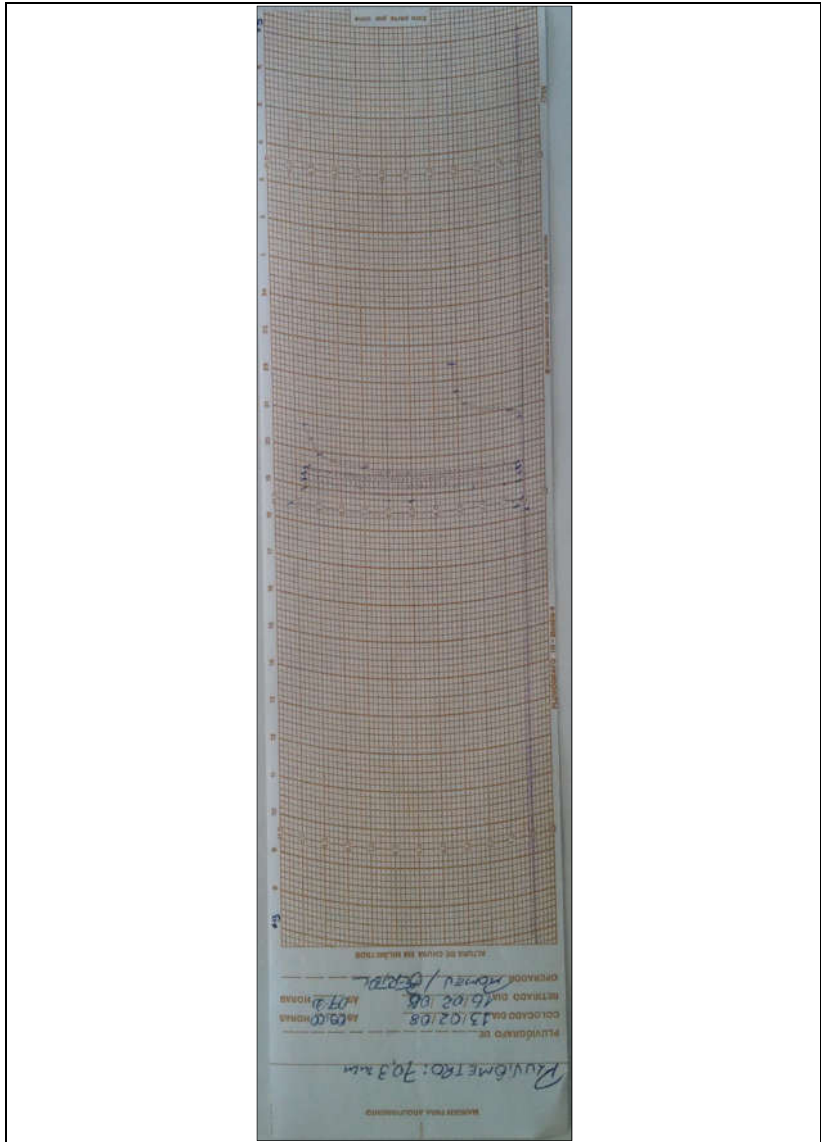
Estação de tratamento de esgoto teve que ser desligada havendo prejuízos.

11 - Informações sobre o Município					
Ano Atual		Ano Anterior			
População (hab): 156.737	Orçamento (Mil R\$): 300.000,000	PIB (Mil R\$): 2.182.320	Arrecadação (Mil R\$): 257.998,948		
Fls. 9 DEFESA CIVIL					
12 - Avaliação Conclusiva sobre a Intensidade do Desastre (Ponderação)					
Critérios Preponderantes					
Intensidade dos Danos	Pouco Importante	Médio ou Significativo	Importante	Muito Importante	
Humanos	-	-	X	-	
Materiais	-	X	-	-	
Ambientais	X	-	-	-	
Vulto dos Prejuízos	Pouco Importante	Médio ou Significativo	Importante	Muito Importante	
Econômicos	X	-	-	-	
Sociais	-	X	-	-	
Necessidade de Recursos Suplementares	Pouco Vultosos	Mediamente Vultosos ou Significativos	Vultosos porém Disponíveis	Muito Vultosos e Não Disponíveis no SINDEC	
	-	X	-	-	
Critérios Agravantes					
	Pouco Importante	Médio ou Significativo	Importante	Muito Importante	
Importância dos Desastres Secundários	X	-	-	-	
Despreparo da Defesa Civil Local	-	X	-	-	
Grau de Vulnerabilidade do Cenário	-	-	-	X	
Grau de Vulnerabilidade da Comunidade	-	-	X	-	
Padrão Evolutivo do Desastre	Gradual e Previsível	Gradual e Imprevisível	Súbito e Previsível	Súbito e Imprevisível	
	-	-	-	X	
Tendência para agravamento	Não	-	-	Sim	
	X	-	-	-	
Conclusão					
Nível de Intensidade do Desastre	I	II	III	IV	
Porte do Desastre	Pequeno ou Acidente	Médio	Grande	Muito Grande	
	-	X	-	-	
13 - Instituição Informante		Responsável			
Nome da Instituição		CEZARIO FLORES DE OLIVEIRA			
DEFESA CIVIL LAGES - SC					
Cargo	Assinatura	Telefone	Dia	Mês	Ano
Coordenador		(49) 3222-9661 (49) 8406-4037 (49) 8406-3926	17	08	2011
Coordenador de Defesa Civil Lages-SC		Informada			
14 - Instituições Informadas					
Coordenadoria Estadual de Defesa Civil		X			
Coordenadoria Regional de Defesa Civil		-			
15 - Informações Complementares					
Moeda utilizada no preenchimento: REAL		Taxa de conversão para o Dólar Americano: 1,59			

ANEXO D – Pluviograma do evento de 18 e 19/05/2005



ANEXO E – Pluviograma do evento de 15 e 16/02/2008



ANEXO F – Pluviograma do evento de 08 e 09/08/2011

